

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Vanessa Hernandes da Luz

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM UM
DEPÓSITO: ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE
INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DO INCÊNDIO**

Porto Alegre
julho 2017

VANESSA HERNANDES DA LUZ

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM UM
DEPÓSITO: ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE
INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DO INCÊNDIO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff
Coorientador: Jacinto Manuel Antunes de Almeida

Porto Alegre
julho 2017

VANESSA HERNANDES DA LUZ

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM UM
DEPÓSITO: ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE
INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DE UM INCÊNDIO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora.

Porto Alegre, julho de 2017

Profa. Ângela Gaio Graeff
Ph.D pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Jacinto Manuel Antunes de Almeida
Doutor pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff
(UFRGS)
Ph.D pela Universidade de Sheffield

Jacinto Manuel Antunes de Almeida
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Prof. Jean Marie Desir
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de
Janeiro

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra
(UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe e minha vó, Miriam e Aurora, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Ângela Gaio Graeff, orientadora deste trabalho, pelo conhecimento, disposição, atenção e incentivo, tanto na orientação de seus alunos de trabalho de conclusão de curso como na atividade letiva da graduação, não poupando esforços para que seus alunos possam sair com a maior bagagem de conhecimentos possível.

Agradeço ao Professor Jacinto Manuel Antunes de Almeida, coorientador deste trabalho, pela atenção sempre rápida e disposta.

Agradeço a Juliane N. Dolvistch pelas aulas do curso introdutório em *Pyrosim* realizado em 2015 no programa de extensão da UFRGS realizado junto ao Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul, onde pude conhecer esta ferramenta de análise numérica de incêndios e também pela disposição em esclarecer dúvidas quanto ao programa durante este trabalho.

Agradeço à minha família e amigos pelo apoio incondicional e por entender o tempo que estive ausente para realização deste trabalho.

Que nada nos defina. Que nada nos sujeite. Que a
liberdade seja a nossa própria substância.

Simone de Beauvoir

RESUMO

Este trabalho versa sobre como a carga de incêndio, a ventilação e a disposição dos materiais combustíveis influenciam no comportamento de um incêndio em um pavilhão simulado computacionalmente. Embora se tenha conhecimento de como é o comportamento do fogo é difícil prever como um incêndio irá se comportar segundo tantas variáveis que o influenciam e certamente nenhum incêndio será igual a outro. Desta forma há necessidade que se entenda melhor como os incêndios se comportam a para que se projete edificações cada vez mais seguras e também se possa avaliar de forma eficiente o uso dos métodos de prevenção e combate a incêndio. A partir da revisão da literatura foi possível escolher algumas variáveis de maior influência em um incêndio e modificá-las em uma simulação numérica em uma edificação do tipo depósito. Foram realizadas 12 simulações modeladas no software *Pyrosim*, processadas pelo software *Fire Dynamics Simulator* e visualizadas com o software *Smokeview*, sendo que as variáveis analisadas foram a carga de incêndio (para os valores de 300MJ/m², 600 MJ/m² e 1200 MJ/m²), a existência ou não de aberturas na edificação e a disposição da carga de incêndio (distribuída uniformemente ou concentrada em uma região). A partir das simulações realizadas numericamente foi possível fazer análises com bases nos arquivos gerados pelos softwares, como imagens, gráficos e estatísticas. Com base na comparação das análises das simulações foi possível concluir que a carga de incêndio de fato influencia muito no comportamento do incêndio, tornando-o consideravelmente mais severo quanto maior for a carga. A outra conclusão foi de que a existência de ventilação faz com que as temperaturas máximas encontradas no ambiente sejam maiores ao compararmos com o depósito sem aberturas. Na edificação com aberturas pode se observar que a temperatura ambiente se mantém mais alta após a ocorrência do incêndio generalizado, uma vez que há reposição do oxigênio demandado pela queima de grande quantidade de material combustível. Já com relação a disposição da carga de incêndio uniformemente distribuída ao longo da edificação para a concentrada em apenas um lado não se pode chegar a uma conclusão definitiva uma vez que os resultados não indicaram nenhuma repetição de padrão.

Palavras-chave: Simulação computacional de incêndios. *Pyrosim*. *Fire Dynamics Simulator*.
Segurança contra incêndios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de delineamento da pesquisa.....	18
Figura 2 -Incêndio nas arquibancadas do Grand Circo Norte-Americano.....	21
Figura 3 - Fachada do Edifício Andraus sob o incêndio de 1972.....	22
Figura 4 - Fachada do edifício Joelma sob incêndio em 1974.....	23
Figura 5 - Bombeiros ainda lutando contra o incêndio na boate Kiss.....	24
Figura 6 - Triângulo e tetraedro do fogo.....	25
Figura 7 - Fluxo de calor por condução através de um material.....	28
Figura 8 - Convecção durante um incêndio.....	29
Figura 9 - Fluxo de calor por radiação.....	30
Figura 10 - Curva de temperatura-tempo das fases de um incêndio.....	32
Figura 11 – Movimentação dos produtos da combustão.....	33
Figura 12 - fluxo de gases e fumaça atingindo o teto.....	34
Figura 13 - Variação da temperatura de um incêndio dependente do combustível.....	37
Figura 14 - Incêndio controlado pela ventilação.....	38
Figura 15 – Planta baixa da edificação simulada.....	42
Figura 16 – Corte da fachada da edificação simulada com as aberturas.....	43
Figura 17 - Blocos de papel uniformemente distribuídos.....	45
Figura 18 - Blocos concentrados dentro da edificação.....	45
Figura 19 - Telas de configuração de parâmetros de reações do Pyrosim.....	49
Figura 20 - Tela de propriedades térmicas de material no Pyrosim.....	50
Figura 21 - Malha uniforme de 0,5m e malha mista de 0,25 m e 0,5 m.....	52
Figura 22 – Localização da fonte de ignição do incêndio simulado.....	53
Figura 23 - Localização dos termopares no pavilhão.....	53
Figura 24 - Imagens da simulação 1.....	56
Figura 25 – Imagens da simulação 2.....	57
Figura 26 - fogo junto ao teto.....	58
Figura 27 -Imagens da simulação 3.....	58

Figura 28 – Imagens da simulação 4	59
Figura 29 - Imagens da simulação 5	60
Figura 30 - Imagens da simulação 6	61
Figura 31 - Imagens da simulação 7	62
Figura 32 - Fatias de temperatura com indícios da movimentação dos gases quentes.....	63
Figura 33 - Imagens da simulação 8	64
Figura 34 - Imagens da simulação 9	65
Figura 35 - Imagens da simulação 10	66
Figura 36 - Imagens da simulação 11	67
Figura 37 - Imagens da simulação 12	68
Figura 38 – Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação sem aberturas e distribuição uniforme da carga de incêndio	71
Figura 39 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação sem aberturas e carga de incêndio concentrada.....	71
Figura 40 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação com aberturas e carga de incêndio uniformemente distribuída.....	72
Figura 41 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação com aberturas e carga de incêndio concentrada	72
Figura 42 – Curvas de temperaturas médias do ambiente ao longo do tempo.....	74
Figura 43 - Relação da temperatura e do oxigênio ao longo do tempo das simulações sem aberturas	76
Figura 44 - Relação da temperatura e do oxigênio ao longo do tempo das simulações com aberturas	77
Figura 45 – Relação da taxa de queima com o oxigênio do ambiente para simulações sem aberturas	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das edificações e áreas de risco quanto à carga de incêndio	44
Tabela 2 – Altura dos blocos de papel utilizados como carga de incêndio.....	47
Tabela 3 – Propriedades térmicas do papel.....	50
Tabela 4 – Localização das fatias de visualização de temperaturas no modelo.....	53
Tabela 5 – Dados quantitativos das simulações realizadas.....	70
Tabela 6 – Resumo da análise de temperaturas máximas de cada dispositivo de coleta de dados.....	71

LISTA DE SIGLAS

CBMRS – Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul

CPU – *Central Processing Unit*

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

GLP – Gás liquefeito de petróleo

IT – Instrução técnica

NIST – *National Institute of Standards and Technology*

RAM – *Random Access Memory*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área (m^2)

H – potencial calorífico (MJ/kg)

m – metros (m)

M_i – massa de cada componente i do material (Kg)

min – minuto (min)

q – carga de incêndio específica (MJ/m²)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
2.2 OBJETIVO	17
2.3 HIPÓTESE	18
2.4 DELIMITAÇÕES	18
2.5 LIMITAÇÕES	19
2.6 DELINEAMENTO	19
3 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	21
3.1 CONTEXTO HISTÓRICO	21
3.1.1 Gran Circo Norte-Americano	21
3.1.2 Edifício Andraus, São Paulo	22
3.1.3 Edifício Joelma, São Paulo	23
3.1.4 Boate Kiss, Santa Maria	23
3.1.5 Outros incêndios importantes	24
3.2 A COMBUSTÃO	25
3.2.1 Combustível	26
3.2.1.1 Tipos de combustíveis	26
3.2.1.2 Temperaturas características dos materiais	27
3.2.2 Comburente	27
3.2.3 Calor.....	27
3.2.4 Reação em cadeia.....	28
3.3 MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR	28
3.3.1 Condução	28
3.3.2 Convecção	29
3.3.3 Radiação	29
3.4 FASES DE UM INCÊNDIO	30
3.4.1 Elevação Progressiva da Temperatura	30
3.4.2 Aquecimento Brusco	30
3.4.3 Resfriamento e Extinção do Fogo	31
3.4.4 Outros fenômenos em incêndios	32
3.4.4.1 Pluma	32

3.4.4.2 Ceiling Jet	33
3.5 TAXA DE LIBERAÇÃO DE ENERGIA	34
3.5.1 Combustão Viva	34
3.5.2 Combustão Lenta	35
3.6 VA RIÁVEIS DE INFLUÊNCIA EM UM INCÊNDIO	35
3.6.1 Cargas de Incêndio	35
3.6.2 Ventilação	37
4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS	39
4.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO	39
4.1.1 Modelos de Duas Camadas	39
4.1.2 Dinâmica Computacional de fluidos	40
4.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	40
4.2.1 Fire Dynamics Simulator	40
4.2.2 Smokeview	40
4.2.3 Pyrosim	41
5 AMBIENTE SIMULADO	42
5.1 ABERTURAS.....	43
5.2 CARGAS DE INCÊNDIO	43
5.3 DISTRIBUIÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	44
6 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	48
6.1 REAÇÃO DE COMBUSTÃO	48
6.2 PROPRIEDADES DO PAPEL	49
6.3 DEFINIÇÃO DA MALHA DA SIMULAÇÃO	50
6.4 FONTE DE IGNIÇÃO	51
6.5 FERRAMENTAS PARA COLETA DE DADOS	52
7 RESULTADOS OBTIDOS	54
7.1 ANÁLISE VISUAL DAS SIMULAÇÕES	54
7.1.1 Simulação 1: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	55

7.1.2 Simulação 2: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas.....	56
7.1.3 Simulação 3: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	57
7.1.4 Simulação 4: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas	58
7.1.5 Simulação 5: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	59
7.1.6 Simulação 6: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas	60
7.1.7 Simulação 7: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	61
7.1.8 Simulação 8: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas	63
7.1.9 Simulação 9: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	64
7.1.10 Simulação 10: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas.....	65
7.1.11 Simulação 11: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas fechadas	66
7.1.12 Simulação 12: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e janelas abertas	67
7.1.13 Conclusões obtidas através da análise visual.....	68
7.2 ANÁLISE QUANTITATIVAS DAS SIMULAÇÕES	68
7.3 ANÁLISE QUALITATIVA DAS SIMULAÇÕES	70
7.3.1 Comparações entre cargas de incêndios	70
7.3.2 Comparação entre simulações com e sem aberturas, cargas distribuídas uniformemente e cargas concentradas	73
7.3.3 Oxigênio no ambiente	75
8 CONCLUSÕES	80
8.1 CONCLUSÕES SOBRE A VARIAÇÃO DA CARGA DE INCÊNDIO	80
8.2 CONCLUSÕES SOBRE A EXISTÊNCIA OU NÃO DE ABERTURAS	81
8.3 CONCLUSÕES SOBRE DISTRIBUIÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL	82
8.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do ser humano o fogo que nos aquece e nos conforta tem sido nosso aliado e também inimigo quando este sai de controle. O valor de uma vida humana perdida através de um sinistro de incêndio é incalculável e por isso há décadas o ser humano vem buscando métodos para entender e se proteger contra o fogo.

As particularidades de uso de uma edificação geralmente não são estudadas devido ao alto custo e a complexidade de se estudar o comportamento do fogo em um incêndio, aparecendo assim a simulação computacional como uma ferramenta de estudo mais viável, como a que será empregada e analisada neste trabalho.

Um dos métodos que vem sendo usado para entender o comportamento de incêndios é o da análise computacional que, por meio de simulações, fornece dados que são comparados com os estudos já realizados ou até com incêndios já ocorridos. O método computacional geralmente requer um menor custo para sua realização em relação aos modelos reais de incêndios, em escala de tamanho real ou reduzida.

Um dos principais *softwares* de simulação de incêndios é o *Pyrosim* no qual podemos criar o ambiente, inserir dispositivos medições de temperatura, energia, características térmicas dos materiais, parâmetros dos produtos da combustão e até do ar. Este *software* cria linhas de códigos que podem ser processadas pelo *Fire Dynamic Simulator* (FDS) gerando as informações que foram solicitadas na modelagem. Após o processamento pelo FDS é possível visualizar o desenvolvimento da simulação ao longo do tempo através do *Smokeview*, onde se pode visualizar chamas, fumaça, entre outros eventos.

Este trabalho tem por finalidade analisar diferentes variáveis que podem influenciar no comportamento de um incêndio em um depósito com geometria definida, através de simulação computacional pelo software *Pyrosim*, *FDS* e *Smokeview*. Dentre as variáveis analisadas estão a quantidade e distribuição da carga de incêndio inserida no meio, bem como a utilização ou não de aberturas na edificação e a disposição da carga de incêndio no ambiente simulado.

2 DIRETRIZES

Este capítulo versa acerca da questão principal que deverá ser respondida por este projeto, seu objetivo principal, hipótese a ser adotada de início, delimitações, limitações do estudo, delineamento da pesquisa e seu diagrama de etapas.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Este trabalho busca responder a seguinte questão: As variações de carga de incêndio, a existência ou não de aberturas e a disposição do material combustível no ambiente alteram o comportamento do incêndio? Se a resposta para esta pergunta seja sim, como isto ocorre e quais destas variáveis analisadas mais influenciam?

2.2 OBJETIVO

O objetivo principal deste estudo é analisar o comportamento de um incêndio frente à existência ou não de aberturas na edificação, quantidades de cargas de incêndio e sua disposição dentro da edificação simulada computacionalmente para um depósito de geometria pré-fixada.

Mais especificamente o objetivo será analisar como a temperatura varia ao longo do tempo no interior da edificação quando são alteradas a existência ou não de aberturas, quantidade de carga de incêndio, sua disposição no ambiente incendiado e quais são as que mais influenciam.

2.3 HIPÓTESE

Foram adotadas como hipóteses iniciais as seguintes afirmações:

- cargas de incêndio mais elevadas aumentam as temperaturas e propagam o fogo mais rapidamente.
- a existência de aberturas aumenta a taxa de combustão dos materiais fazendo com que o incêndio se desenvolva mais rapidamente de uma maneira geral.

2.4 DELIMITAÇÕES

Em uma simulação computacional há inúmeras possibilidades de análise a serem adotadas, e como não há tempo hábil para se testar todas entre si, faz-se necessário delimitar a pesquisa. Neste caso foi estudado o comportamento frente a uma situação de incêndio através de simulação computacional pelo software *Pyrosim*, em um depósito com dimensões pré-fixadas.

2.5 LIMITAÇÕES

Por motivos de prazos para o desenvolvimento deste projeto, foi simulado em apenas uma ferramenta computacional, o software *Pyrosim* com as seguintes limitações:

- não foram levados em conta os revestimentos de parede e piso como variáveis desta simulação, ou seja, estes foram considerados inertes.
- foram consideradas apenas três cargas de incêndios, equivalentes as das limítrofes de classificações de risco de incêndio de edificações conforme o Decreto nº 53.280 de 1º de novembro de 2016 do Rio Grande do Sul (1200 MJ/m², 600 MJ/m² e 300 MJ/m²).
- foram analisadas apenas duas configurações de aberturas, fechadas (inexistente) e abertas (existente).
- as aberturas como janelas e portas, quando fechadas foram consideradas estanques, ou seja, não houve entrada de oxigênio de fora da edificação.
- foram utilizadas duas configurações de distribuição da carga de incêndio na edificação. Uma espalhando os materiais combustíveis de maneira uniforme ao longo da edificação e outra agrupando a mesma quantidade de carga de incêndio

específica em apenas um lado da edificação, dobrando a altura do material utilizado como combustível.

2.6 DELINEAMENTO

A seguir na Figura 1 são apresentadas as etapas básicas de elaboração deste projeto na forma de fluxograma:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) análise das variáveis de influência
- c) simulação no *software Pyrosim*;
- d) análise dos resultados;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Fluxograma de delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

Inicialmente foi realizada uma **pesquisa bibliográfica** que serviu para construir embasamento técnico para o desenvolvimento do modelo a ser simulado no Pyrosim. Primeiro foram abordados aspectos conceituais de um incêndio, e estudo das variáveis de influência. Esta etapa desenvolveu-se através de leitura de normas, leis e bibliografia técnica.

Logo após foi realizada a **análise das variáveis que mais influenciam** um incêndio e os motivos delas possuírem esta influência sobre o fogo e escolhidas para serem alteradas durante o processo de simulação.

A **simulação** foi realizada no software Pyrosim, que possui o Fire Dynamics Simulator e Smokeview integrados e permite a visualização da simulação.

A **análise dos resultados** foi baseada no exame das informações visuais das simulações, em curvas de temperatura x tempo e tabelas com temperaturas máximas atingidas no ambiente e de termopares.

Por último foram realizadas as **considerações finais** e conclusões sobre trabalho.

3 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

Neste capítulo será abordado o conceito de combustão, suas formas e fases importantes, o conceito de propagação de fogo, variáveis de influência em um incêndio e alguns incêndios históricos.

3.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE INCÊNDIOS NO BRASIL

Até o início dos anos 70 a segurança contra incêndio era vista como de incumbência do corpo de bombeiros e não se pensava em prevenção de sinistros, existiam poucas regulamentações e normas, que praticamente só mencionavam obrigatoriedade de hidrantes e extintores. (SEITO et al., 2008).

Com o crescimento das edificações e da quantidade de materiais estocados nelas o potencial para ocorrência de grandes incêndios também aumentava, até que eles realmente começaram a acontecer no Brasil.

3.1.1 Gran Circo Norte-americano, Niterói, Rio de Janeiro

De acordo com Seito et al. (2008) este foi até então o maior incêndio com perdas de vidas no Brasil, ocorrido no dia 17 de dezembro de 1961 o incêndio no Gran Circo Norte-americano provocou 250 mortes e 400 feridos. Foram necessários 3 minutos para que o toldo em chamas caísse sobre a plateia de 2500 pessoas. Não havia plano de escape para o público, nem dimensionamento de saídas de emergência. As pessoas morreram queimadas e pisoteadas por não conseguirem sair devido ao amontoado de corpos. Este incêndio teve origem criminosa e seu culpado foi julgado e condenado. A figura 2 mostra como ficou as arquibancadas do circo após o incêndio.

Figura 2 -Incêndio nas arquibancadas do Grand Circo Norte-Americano



(fonte: O Globo)

3.1.2 Edifício Andraus, São Paulo

Ocorrido em 24 de fevereiro de 1972, foi o primeiro incêndio de grandes proporções em prédios altos no Brasil. Era um edifício comercial e escritórios que possuía 31 andares e sua fachada era de pele de vidro, o que facilitou a propagação do fogo de um andar para o outro. Deste incêndio resultaram 16 mortos e 336 feridos e este número não foi maior, pois o prédio possuía um heliponto na cobertura que serviu de abrigo para muitas vítimas (SEITO et al., 2008). A figura 3 mostra a fachada do edifício Andraus tomada pelo fogo.

Figura 3 - Fachada do Edifício Andraus sob o incêndio de 1972



(fonte: Ultimo Segundo IG)

3.1.3 Edifício Joelma, São Paulo

O Edifício Joelma de 23 andares de estacionamentos e escritórios pegou fogo no dia 1º de fevereiro de 1974, provocando 179 mortos e 320 feridos. Muitas vítimas, conhecendo o incidente com o edifício Andraus, subiram até o terraço e ali faleceram pois este não havia o heliponto e beirais que impediam a chegada da fumaça e das chamas até às mesmas. Assim como no edifício Andraus no edifício Joelma não havia escada de segurança protegida do fogo. (SEITO et al., 2008). Na figura 4 podemos ver a fachada do edifício sob as chamas.

Figura 4 - Fachada do edifício Joelma sob incêndio em 1974



(fonte: Globo News)

3.1.4 Boate Kiss, Santa Maria, Rio Grande do Sul

No dia 27 de janeiro de 2013 ocorreu a pior tragédia do estado do Rio Grande do Sul, um incêndio em uma boate deixou 242 mortos e 680 feridos. O incêndio começou quando um dos integrantes do grupo musical que se apresentava acendeu um artefato pirotécnico que incendiou o revestimento do forro da boate. A espuma usada como isolamento acústico na boate ao queimar-se liberou cianeto, um gás extremamente letal ao ser humano e foi o responsável pela maioria das mortes na boate Kiss. Outros fatores foram decisivos na quantidade de vítimas como uma única saída de emergência para todo o público, o impedimento da saída pelos seguranças, falta de sinalização de orientação de saída entre outros. A Figura 5 mostra a luta dos bombeiros contra o fogo na fachada da Boate Kiss.

Figura 5 - Bombeiros ainda lutando contra o incêndio na boate Kiss



(fonte: UOL Notícias)

Após este acontecimento, devido à pressão pública, o Estado do Rio Grande do Sul aprovou as pressas a Lei Complementar nº 14.376 em dezembro de 2013, a chamada de Lei Kiss, que foi um marco importante na legislação de segurança contra incêndios no estado.

3.1.5 Outros incêndios importantes

Em 18 de dezembro de 1970 na fábrica da Volkswagen do Brasil, na cidade de São Bernardo do Campo iniciava um grande incêndio em uma das alas da fábrica. Este era o maior pavilhão industrial da América Latina, com 3000 m² e 30 metros de altura. Cerca de 4 mil funcionários trabalham no local no momento e conseguiram evacuar rapidamente o prédio de 3 andares. Foram usados cerca de 1000 bombeiros no combate a este incêndio. Cerca de 200 pessoas tiveram ferimentos leves, envolvendo pequenas queimaduras e intoxicações. Cerca de 50 pessoas tiveram ferimentos mais graves como fraturas, queimaduras e intoxicação. Segundo os jornais da época foram 30 mortos e segundo um comunicado oficial da Volkswagen apenas uma pessoa morreu: um dos primeiros bombeiros que chegaram ao local. (ZONA DE RISCO, 2008)

Segundo jornal Metro Porto Alegre (2016), na tarde de 27 de abril de 1976 ocorria um dos maiores incêndios de Porto Alegre. Na edificação de 10 andares funcionava a loja de departamentos Renner que ficou completamente tomada por chamas causando desespero nas vítimas já que as janelas eram basculantes e gradeadas, o que impedia a saída da fumaça e o resgate das vítimas por ali. O fogo começou no terceiro andar por algum cigarro ou assemelhado. Neste andar eram condicionados plásticos, caixas e no

momento haviam tintas e solvente que resultaram em explosões. Ao todo foram 41 mortos e mais de 60 feridos. Após duas horas do início do incêndio parte do edifício desabou. Nas operações de resgate e combate ao fogo foram utilizados 200 bombeiros e 13 viaturas. O edifício foi implodido em seu lugar foi construído outro.

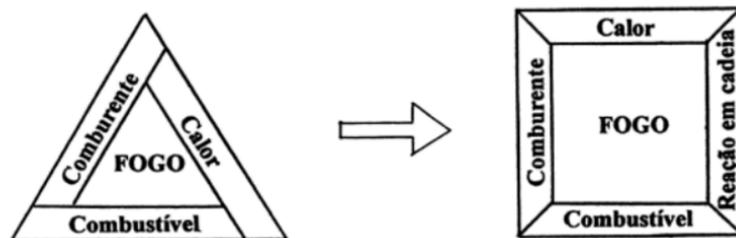
Na tarde do dia 20 de junho de 2000 na cidade de Uruguaiana uma estufa elétrica presa à parede caía causava um incêndio que traria a óbito 12 crianças entre 2 e 3 anos que dormiam no local. A sala de 20 m² estava fechada sem a observância de nenhum funcionário no momento do incêndio. (CORREIO DO POVO, 2010).

3.2 COMBUSTÃO

O fogo é um processo de transformação química de materiais combustíveis ou inflamáveis em gases e combinados com uma fonte de calor e um comburente, o oxigênio, iniciam esta transformação química liberando calor e luz, a isto chamamos de combustão. (CAMILLO JÚNIOR, 2013).

O fogo é composto por três elementos que juntos promovem esta reação química exotérmica de oxidação rápida, são elas: combustível, comburente e a fonte de calor, formando o triângulo do fogo. Para este fogo se manter ativo é necessário que haja uma reação em cadeia, formando o tetraedro do fogo (BRENTANO, 2007), como podemos ver na Figura 6, que representa a constituição do fogo:

Figura 6 - Triângulo e tetraedro do fogo



(fonte: BRENTANO, 2007, p 90)

3.2.1 Combustível

Camillo Júnior (2013) define combustível como sendo um componente que alimenta o fogo e ainda serve de corpo de propagação para o mesmo. Enquanto houver este componente haverá fogo. Para entrar em combustão o combustível deve estar em contato com o oxigênio e ser aquecido a uma temperatura específica até que o material comece a liberar gases, iniciando assim uma reação em cadeia.

Já Brentano (2007) diz de uma maneira mais simplificada que o combustível é toda a matéria que tem a propriedade de queimar. Esta matéria aquecida junto ao oxigênio faz a mistura entrar em combustão.

3.2.1.1 Tipos de combustíveis

Os materiais combustíveis podem ser sólidos, líquidos e gasosos. Os materiais tipo sólidos necessitam ser primeiramente aquecidos por uma fonte de calor até liberarem vapores que misturados ao oxigênio do ar geram uma mistura inflamável, a isto chamamos de pirólise. Como exemplo destes materiais temos o papel, madeira, plásticos, etc. Os materiais do tipo líquidos, como álcool, querosene, etc, necessitam serem aquecidos e vaporizados para misturar-se com o oxigênio até ser obtida a mistura inflamável. Já os materiais gasosos como já estão no mesmo estado que oxigênio apenas misturam-se sem a previa necessidade do aquecimento primário, como exemplo deste material podemos citar o gás de cozinha (GLP) (BRENTANO,2015).

De acordo com Seito et al. (2015), para que haja uma mistura inflamável o gás proveniente do material combustível deve se misturar ao oxigênio em determinadas proporções dentro de um certo volume. Cada material possui uma porcentagem de limite superior e um limite inferior da proporção, onde ocorre a ignição.

3.2.1.2 Temperaturas características de um material

Neste processo de combustão sofrido pelos materiais combustíveis há três temperaturas bem específicas que dependem de cada material, são elas o ponto de fulgor, o ponto de combustão e a temperatura de ignição. A ponto de fulgor ou também conhecida como *flash point* é a temperatura mínima capaz de criar um lampejo porem não é capaz manter

acesa uma chama. Nesta etapa o material começa a liberar gases que irão se misturar ao oxigênio, por isso quanto mais baixo o ponto de fulgor de um material mais baixa é a temperatura de ignição de um material. Já no ponto de combustão, *fire point*, a temperatura é suficiente para que após a retirada da fonte de calor o material continue realizando o processo de queima. O ponto de ignição é a temperatura mínima na qual um material começa a emitir gases suficientemente para que ao se misturarem com oxigênio entrem em ignição, independente da fonte de calor aplicada (BRENTANO, 2015).

3.2.2 Comburente

O principal comburente do fogo é o oxigênio que na atmosfera há em abundância, ele serve de elemento ativador para o fogo. Segundo Camillo Júnior (2013) o oxigênio dá vida ao fogo, e este está presente em 21% do ar atmosférico, sendo assim elemento presente em praticamente todos os ambientes. De acordo com Brentano (2007) em locais onde há maior circulação de ar as chamas de um incêndio serão mais intensas, pois estes são mais ricos em oxigênio. Além disso quando a concentração de oxigênio do ar cai para menos de 14% a maioria dos materiais combustíveis não consegue manter a chama acesa.

3.2.3 Calor

Segundo Brentano (2007), o calor é o gatilho de início da mistura inflamável que dá partida a reação química em cadeia que acontece após o comburente atingir sua temperatura inicial de combustão. Cada material combustível possui sua temperatura inicial de ignição, ou seja, cada um deles necessita de uma quantidade diferente de energia calorífica para iniciar sua queima. Como fontes de calor causadoras de incêndios podemos citar o atrito que ocorre em máquinas e equipamentos, distúrbios de eletricidade, uso fornos e fogões de maneira inadequada, cigarros, manuseio indevido de líquidos inflamáveis, raios e o incêndio criminoso.

3.2.4 Reação em cadeia

É o processo que ocorre em cada molécula do combustível, uma molécula ao entrar em combustão acaba por aquecer sua vizinha, que por sua vez também entra em combustão e assim por diante, até acabarem as moléculas de combustível ou o comburente (BRENTANO,2015).

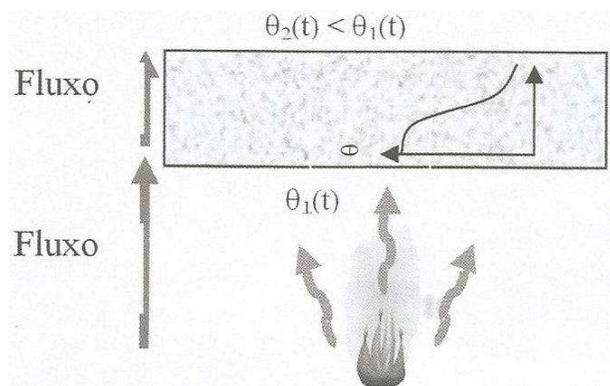
3.3 MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR E PROPAGAÇÃO DO FOGO

Após o fogo ser iniciado passa a acontecer a transmissão da energia provocada, e esta pode se dar por convecção, condução ou radiação, como veremos a seguir.

3.3.1 Condução

Na condução o calor é transferido através de um material sólido pelo contato. Uma molécula aquecida ao entrar em contato com outra agita-a transferindo assim certa energia, propagando o calor. Em um incêndio a propagação do fogo por condução ocorre principalmente através do contato das chamas, assim como o exemplificado na Figura 7. (BRENTANO,2015)

Figura 7 - Fluxo de calor por condução através de um material

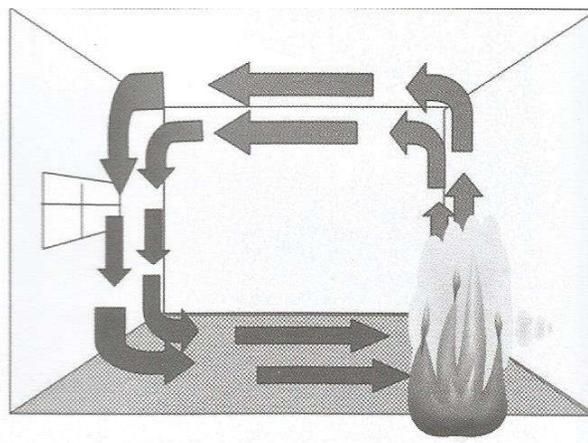


(fonte: SILVA, 2010, p15)

3.3.2 Convecção

De acordo com Silva (2010), este mecanismo de transmissão do calor se dá através da diferença de densidade do ar aquecido por gases do ambiente em chamas. O ar aquecido pelo calor das chamas tende a subir para a parte superior do ambiente pois sua densidade é menor e este é mais leve. Esta movimentação de ar ocorre conforme a Figura 8, a seguir:

Figura 8 - Convecção durante um incêndio



(fonte: SILVA, 2010, p14)

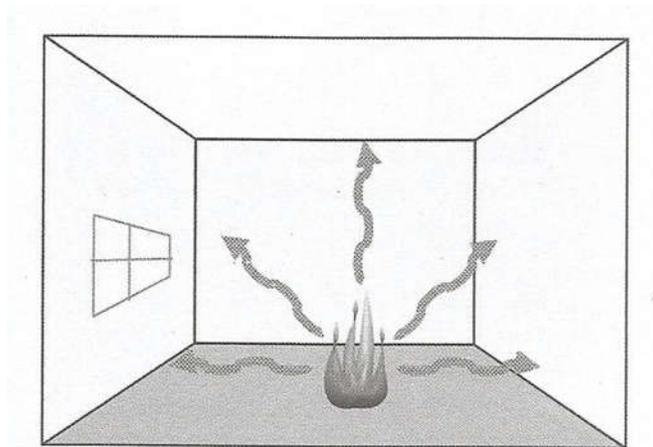
3.3.3 Radiação

Conforme Silva (2010) a radiação de calor é propagada de um corpo com mais alta temperatura para um de mais baixa através de ondas que se deslocam no espaço.

Para Seito et al. (2015) esta energia é transferida por ondas eletromagnéticas.

Já para Brentano (2015) a radiação térmica acontece em todas as direções partindo de um corpo aquecido, semelhante à luz. O alcance desta radiação quando emitida através de aberturas depende do tamanho desta, de propriedades dos materiais que estão emitindo a radiação e da existência de compartimentação interna, conforme a figura 9, a seguir:

Figura 9 - Fluxo de calor por radiação



(fonte: SILVA, 2010, p15)

3.4 FASES DE UM INCÊNDIO

Neste item serão abordadas as fases de desenvolvimento de um incêndio tais como a de elevação inicial e progressiva da temperatura, seu aquecimento brusco, seu resfriamento e extinção.

3.4.1 Elevação progressiva da temperatura

É nesta fase que há o surgimento do fogo e sua propagação sucessiva de molécula em molécula no material incendiado. O objeto incendiado pode ser queimado completamente sem que haja sua propagação para outros objetos, então o incêndio não passaria desta fase, gerando gases tóxicos, mas de baixo risco estrutural. (SILVA, 2010)

3.4.2 Aquecimento brusco

Nesta fase há propagação do fogo ocasionado pela queima de vários materiais no ambiente. Com a oxigenação do local, há uma alimentação da inflamação, o que acaba por ocorrer um aumento da temperatura do local, provocando novos focos de incêndio.

Segundo o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (2006) a chama se propaga para os materiais combustíveis adjacentes ao foco inicial do incêndio por

radiação e por ação da fumaça e dos gases combustíveis presentes na parte superior do ambiente, fazendo com que todo ambiente se aqueça.

De acordo com Cuoghi (2006) este é um momento crítico, pois podem ocorrer explosões de gases combustíveis.

O ambiente é completamente tomado por fogo e gases tóxicos, nesta fase ocorre o chamado *flashover* ou inflamação generalizada. A segurança estrutural será pouco afetada até o atingir o *flashover*. (SILVA, 2010).

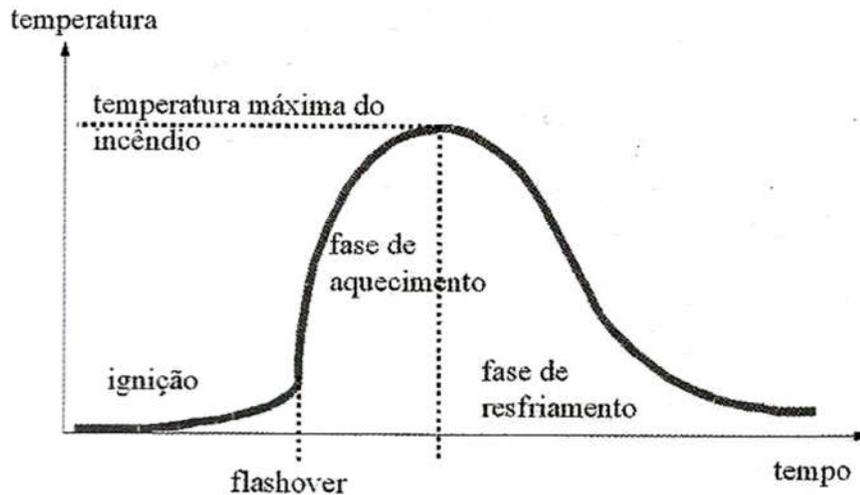
Quando a parte superior do ambiente atinge aproximadamente 600° C todo o material combustível exposto entra em ignição, ocorrendo sua inflamação generalizada. (SEITO et al. , 2008). Cabe ressaltar que para Seito et al. (2008) e Silva (2010) o *flashover* é sinônimo de inflamação generalizada. Já para Buchanan (1994) o *flashover* é apenas um momento de transição entre o aquecimento gradual do ambiente e o incêndio generalizado. Neste trabalho será considerado o *flashover* como sendo sinônimo de incêndio generalizado.

De acordo com Bunchanan (1994), antes da ocorrência do *flashover* o crescimento do incêndio está limitado à taxa de pirólise dos materiais combustíveis e após o *flashover* o incêndio é limitado pela ventilação do ambiente (no momento em que o incêndio é generalizado).

3.4.3 Resfriamento e extinção do incêndio

Após atingir seu ápice a temperatura começa a baixar devido ao consumo do oxigênio que estará se extinguindo do ambiente. Conforme as chamas vão consumindo oxigênio o incêndio vai perdendo sua força, entrando em fase de resfriamento, assim como podemos ver na figura 10. Quando acabar completamente os materiais combustíveis ou oxigênio ocorrerá sua extinção. (SILVA, 2010).

Figura 10 - Curva de temperatura-tempo das fases de um incêndio



(fonte: SILVA, 2010, p15)

3.4.4 Outros fenômenos em incêndios

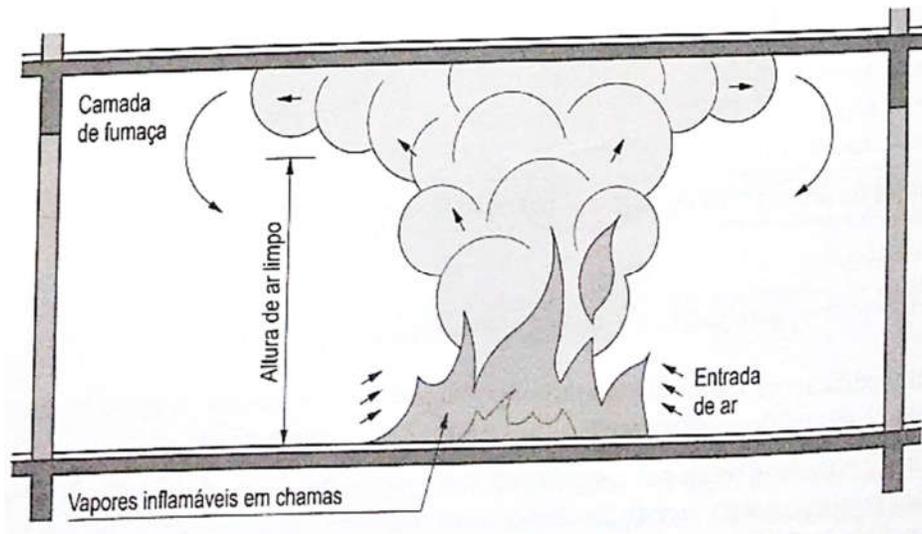
O comportamento de um incêndio pode ser extremamente complexo pois depende de inúmeros fatores ambientais, climáticos, físicos, químicos, entre outros. Desta forma podem ocorrer comportamentos dos mais diversos, algumas vezes imprevisíveis. Além dos comportamentos anteriormente citados podem ocorrer outros fenômenos em um sinistro de incêndio como a pluma e o *ceiling jet*. Estes fenômenos ocorrem seguindo o movimento de convecção, como foi abordado anteriormente.

3.4.4.1 Pluma

Conforme os materiais do ambiente vão sofrendo combustão estes vão liberando gases, vapores e fumaças quentes que por serem mais leves que o ar e se deslocam verticalmente mais rápido que horizontalmente, desenvolvendo um formato de cone invertido. Estes produtos da combustão se acumulam na parte superior do compartimento incendiado (BRENTANO, 2015).

De acordo como Quintiere (1998), quando os gases quentes ascendem no ambiente eles acabam por induzir os gases mais frios para a parte de baixo fazendo com que promova uma entrada de ar na base da pluma. Esta estrada de ar é responsável pelo tamanho da chama e pela altura da pluma. Na figura 11 podemos ver o mecanismo de movimentação dos produtos da combustão.

Figura 11 – Movimentação dos produtos da combustão

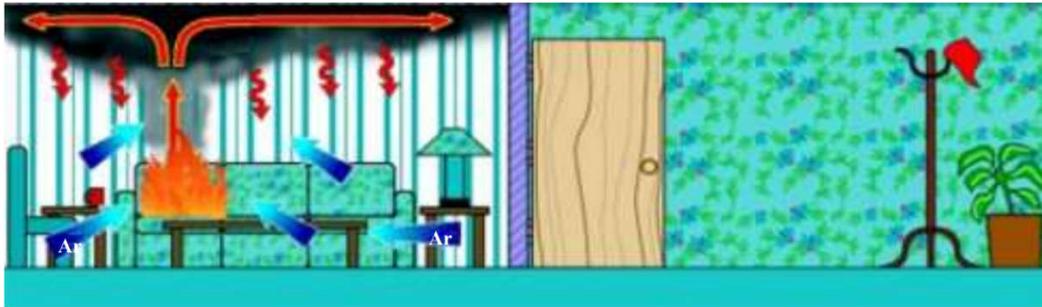


(fonte: BRENTANO, 2015, p114)

3.4.4.2 Ceiling Jet

Segundo Hurley (2016), basicamente o *ceiling jet* refere-se a um fluxo relativamente rápido de gases, impulsionados pela pluma, que se chocam contra o teto. Este fenômeno é importante para o estudo de detectores de fumaça e chuveiros automáticos de combate a incêndios. De acordo com Bonitese (2007), quando o ambiente se aquece forma um gradiente de temperatura fazendo com que os gases e fumaça da pluma subam com certa velocidade e se choquem com o teto na forma de um jato, fazendo com que este jato se espalhe no ambiente de maneira circular, desta forma, o ar que ricocheteia no teto volta a descer, se aquece ainda mais e volta a subir, como podemos ver na Figura 12:

Figura 12 - fluxo de gases e fumaça atingindo o teto



(fonte: BONITESE, 2007, p 66)

3.5 TAXA DE LIBERAÇÃO DE ENERGIA

A taxa de liberação de energia, ou taxa de liberação de calor como também é conhecida, é a quantidade de energia que um material libera para o ambiente ao sofrer combustão. Ao analisarmos esta propriedade podemos ter dimensão da intensidade de um incêndio.

De acordo com Hurley (2016) a taxa de liberação de energia medida em um ambiente com determinada ventilação não pode ser extrapolada para outra edificação com ventilação diferente.

3.5.1 Combustão viva

A combustão viva é caracterizada pela presença do que conhecemos por fogo, a chama visível é geralmente o maior motivo de preocupação em um incêndio pois pode haver grande quantidade de energia envolvida e possuir maiores temperaturas. Na combustão viva estão envolvidos o oxigênio e o gás proveniente dos materiais combustíveis, ou seja, esta mistura ocorre no ar.

Segundo o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (2006), através do tamanho de uma chama não é possível classificar se a combustão é viva ou lenta, para isto é necessária a avaliação da quantidade de energia liberada através da combustão. Para determinar se uma reação química é fogo ou não é preciso que se verifique a energia de ativação por unidade de volume. Esta energia de ativação inicial, no principio de uma combustão é cerca de 1000 kW/m^3 .

3.5.2 Combustão lenta

A combustão lenta, também conhecida como incandescência ou ainda abrasamento, pode ser caracterizada pela mistura do oxigênio diretamente com o material sólido, e pode ocorrer no início ou no fim de uma chama. Ela pode tornar-se chama viva caso haja um fluxo de ar. (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL, 2006)

3.6 VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA EM UM INCÊNDIO

Segundo Seito et al. (2015) não existe a possibilidade de haver incêndios iguais, pois são muitos os fatores de influência, mas alguns fatores são preponderantes como o material combustível e a ventilação do ambiente. Neste capítulo serão abordadas as principais variáveis de influência na temperatura de acordo com a literatura, tais como, cargas de incêndio, distribuição do material combustível no ambiente e ventilação.

3.6.1 Cargas de incêndio

Cada material tem certa capacidade de liberar calor sob combustão, e a essa energia calorífica liberada pela combustão completa do material dá-se o nome de carga de incêndio. A carga de incêndio específica é carga de incêndio dividida pela área de superfície do espaço considerado e é usada como parâmetro de critério de segurança de uma edificação no pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Rio Grande do Sul.

Segundo Seito et al. (2008) a carga de incêndio é uma medida do calor máximo que um material pode liberar ao queimar-se completamente. A carga de incêndio é habitualmente representada pela carga de incêndio específica, que é dividida pela área, e expressa pela equação 1:

$$q_{fi} = \frac{\sum H_i * M_i}{A} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

q_{fi} =Carga de incêndio específica, em mega Joule por metro quadrado de área do piso considerado.

H_i =potência calorífica específica de cada componente do material i , em mega Joule por quilograma.

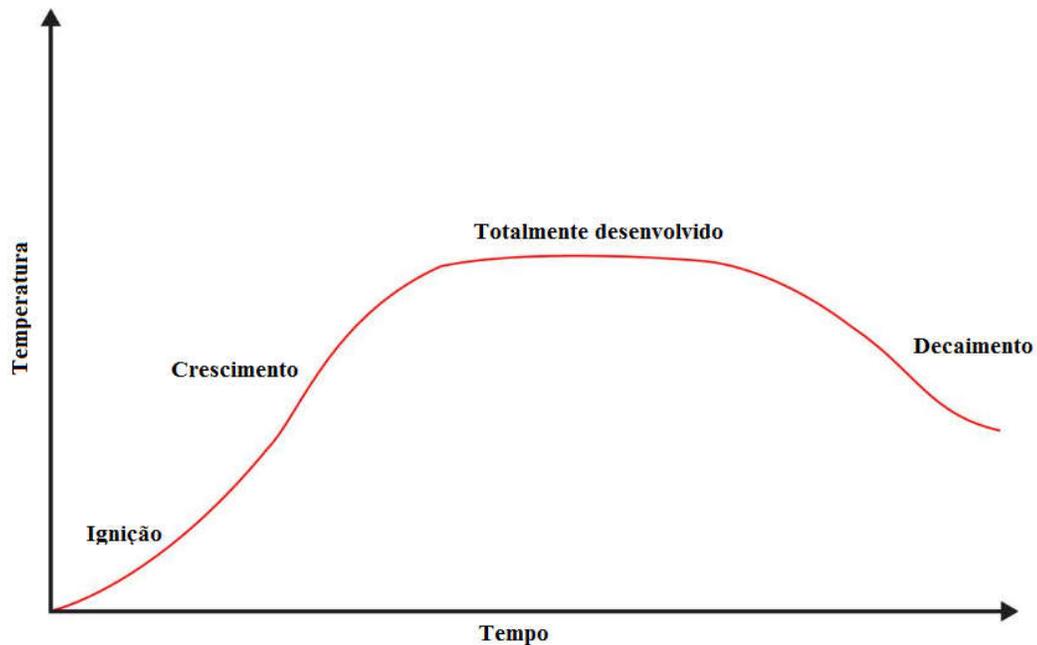
M_i =massa de cada componente i do material, em quilograma.

A = área do piso do compartimento analisado, em metro quadrado.

De acordo com a Instrução Técnica nº 02 (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015) em uma edificação existem as cargas de incêndio incorporadas e as temporárias. Na carga de incêndio incorporada estão incluídos os materiais que compõem a edificação como os revestimentos de piso e forro, paredes, divisórias, cobertura etc. Na carga de incêndio temporária está o material depositado após a construção da edificação, como mobília, decoração, papeis, tecidos, comida etc.

Segundo o *National Institute of Standards and Technology* (2010) a forma mais tradicional de desenvolvimento do fogo é a controlada pelos materiais combustíveis. Quanto mais combustível queima, mais a energia aumenta de forma continuada até que todo o combustível disponível esteja em combustão, neste momento o incêndio estará totalmente desenvolvido. Como o combustível está sendo queimado a energia começa a decair até seu término. Na figura 13, podemos ver a variação da temperatura ao longo do tempo de um incêndio controlado pelos materiais combustíveis:

Figura 13 - Variação da temperatura de um incêndio dependente do combustível



(fonte: National Institute of Standards and Technology, 2010, tradução nossa)

3.6.2 Ventilação

Um dos fatores que comandam a intensidade de um incêndio é a taxa de ventilação, que consequentemente está vinculada à quantidade e geometria das aberturas. A máxima intensidade do incêndio acontece quando a ventilação consegue manter a queima dos gases liberados pelos materiais.

Um evento comum em incêndios é o aumento da taxa de ventilação quando os materiais de janelas e portas não suportam o calor e acabam destruídos, proporcionando a entrada de ar na edificação. (SEITO, et al., 2008)

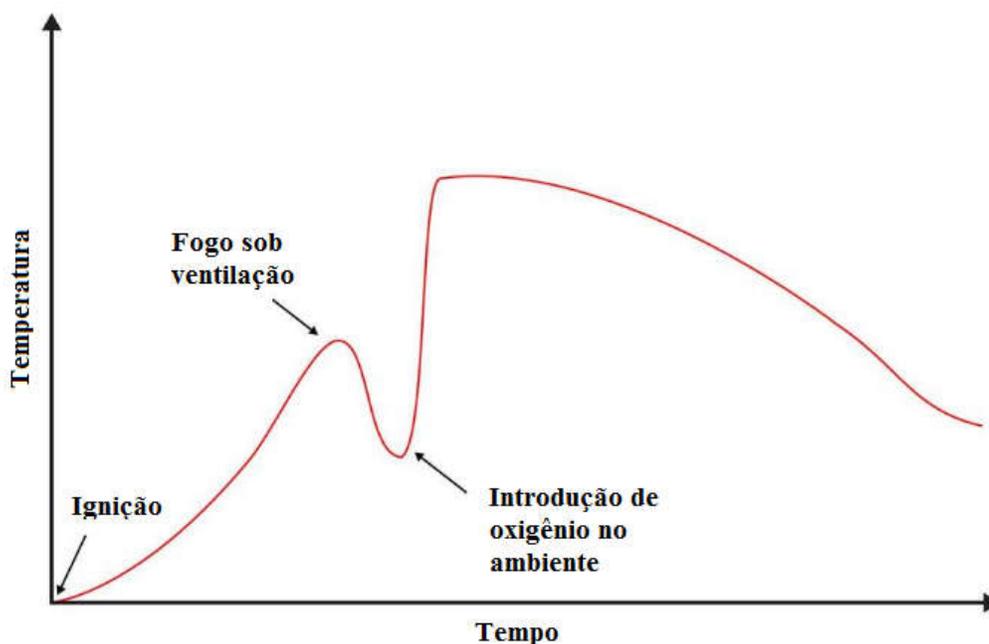
O calor emanado dos materiais combustíveis altera a temperatura do ar a sua volta, provocando uma diferença de temperatura entre a parte externa e a interna da edificação. A diferença de temperatura provoca o movimento ascensional dos gases, que pouco a pouco são substituídos por ar com oxigênio, através das aberturas, alimentando ainda mais o incêndio.

Conforme a Instrução Técnica nº 02 (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015), outro caso é entrada de ar deficiente na edificação, causada por aberturas externas pequenas e em pequena quantidade. Neste caso temos um incêndio de maior duração, a combustão é mais lenta que o caso citado acima, pois a queima é controlada pela quantidade de ar que entra na edificação.

Desta forma pode-se concluir que uma ventilação abundante faz com que o incêndio se desenvolva mais rapidamente e atinja maiores temperaturas do que um incêndio com ventilação deficiente. (BRENTANO, 2015)

De acordo com o *National Institute of Standards and Technology* (2010) o incêndio controlado pela ventilação costuma ocorrer em locais fechados, onde a falta de oxigenação do ambiente diminui a alimentação do fogo. Logo após a ignição do material combustível o oxigênio é abundante e ao misturar-se à pequena quantidade de gases aquecidos provenientes do material provoca uma combustão com chamas vivas. Como a quantidade de oxigênio no ambiente é limitada a liberação de calor diminui juntamente com a temperatura. Isto ocorre até que os bombeiros façam alguma abertura ou as janelas do ambiente se quebrem, onde ocorrerá nova entrada de oxigênio o fogo volte a crescer, ou até ocorrer um incêndio generalizado (*flashover*), como podemos ver na figura 14:

Figura 14 - Incêndio controlado pela ventilação



(fonte: National Institute of Standards and Technology, 2010, tradução nossa)

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS

A simulação computacional é atualmente uma ferramenta muito útil no estudo da dinâmica de incêndios pois nela é possível que se analise o comportamento de incêndios sem entrar de fato em contato com o perigo do fogo como em simulações em tamanho real ou em escala reduzida.

Os modelos computacionais usados em simulações são baseados em um conjunto de equações matemáticas que descrevem os fenômenos físicos e químicos ocorridos em um incêndio. Através do uso destas equações pode-se antever o provável comportamento de um ambiente sob influência do fogo.

Os *softwares* usados para simulação de incêndios são ferramentas que resolvem estas complexas equações matemáticas, iterando inúmeras vezes até que se chegue à resposta desejada.

4.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO

Atualmente existem diversos modelos computacionais para simulação de incêndios baseados no tipo de resposta que se deseja obter e no campo de aplicação a ser usado.

A modelagem da ferramenta de análise e as equações usadas dependerão do campo de atuação, tais como: modelos de análise da resistência de estruturas sob ação do fogo, modelo de análise de evacuação de pessoas em edificações, modelos de análise da temperatura e fumaça, entre outros. A seguir serão descritos os principais modelos de simulação incêndios.

4.1.1 Modelo de duas camadas

Este foi o primeiro modelo largamente usado para simulação de incêndios em edificações, fisicamente simples e de baixa demanda computacional. Esse modelo divide o ambiente em duas camadas, a superior mais quente e onde estará localizada a fumaça, e a inferior

menos quente que a de cima. Através deste modelo é possível a obtenção da distribuição, altura e temperatura da fumaça em uma edificação sob incêndio. Cada camada é considerada uniforme, pois as diferenças são desprezíveis. (PEACOCK, 2005).

4.1.2 Dinâmica computacional de fluidos

Atualmente os modelos mais usados são baseados na dinâmica computacional de fluidos, que usam equações de conservação de massa, espécies, momentos e energia, dividindo os ambientes estudados em pequenas células formando um espaço tridimensional completo. (MCGRATTAN K., 2013)

4.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

A seguir serão apresentadas as funcionalidades e principais características dos softwares que servirão de ferramenta para a simulação do presente trabalho.

4.2.1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

O FDS é um simulador de incêndio livre desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) baseado na dinâmica computacional de fluidos (CFD). Este simulador utiliza a equação de Navier-Stokes para baixas velocidades, com fluxo termicamente orientado e com ênfase em transporte de calor e fumaça. Através deste tipo de modelação podem ser avaliada a dinâmica de um incêndio e a movimentação da fumaça. A radiação térmica é obtida através da utilização da técnica de volumes finitos. (MCGRATTAN K. , 2013). 4.2.2 Smokeview

Assim como o FDS, o *Smokeview* é um software livre desenvolvido pelo NIST que serve para a visualização tridimensional dos dados obtidos na simulação do FDS. O programa permite que se visualizem ambientes, materiais, gráficos de temperatura entre outros.

De acordo com Forney (2017), o *Smokeview* permite visualizar tanto o fogo como a fumaça através de desenhos triangulares em planos paralelos espaçados igualmente. A

cor dada a estes triângulos é atribuída através de um mapa de cores baseando-se na taxa de liberação de calor por unidade de volume (comumente chamada de HRRPUV).

4.2.3 Pyrosim

O *Pyrosim* é um software desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*, utilizado como interface gráfica para modelar para o FDS. Nele é possível inserir a geometria do ambiente, os materiais e suas propriedades, início do incêndio entre outras inúmeras possibilidades.

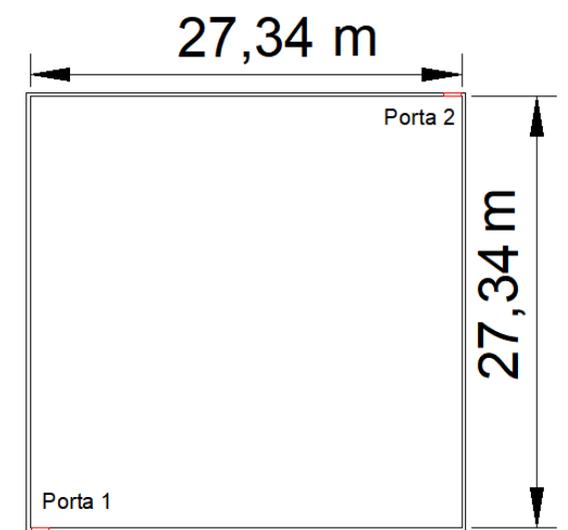
Com o *Pyrosim* é possível importar projetos do AutoCAD e editá-los dentro do próprio programa, facilitando assim o uso do FDS.

5 AMBIENTE SIMULADO

O presente trabalho tem por objetivo simular um depósito com variação de características físicas do ambiente que influenciam em um incêndio, tais como ventilação, quantidade e disposição de cargas de incêndio.

O depósito foi concebido considerando um quadrado com as 4 dimensões laterais com 27,34 metros de comprimentos, totalizando assim 750 m² de área útil interna. A planta baixa do depósito a ser simulado está apresentada na figura 15.

Figura 15 – Planta baixa da edificação simulada



(fonte: elaborado pela autora)

Por se tratar de um depósito relativamente pequeno aos encontrados atualmente no mercado imobiliário a altura interna do depósito foi adotada como sendo de 6 metros.

Na sequência estão detalhadas as variáveis utilizadas no presente estudo e como foram consideradas no modelo em questão.

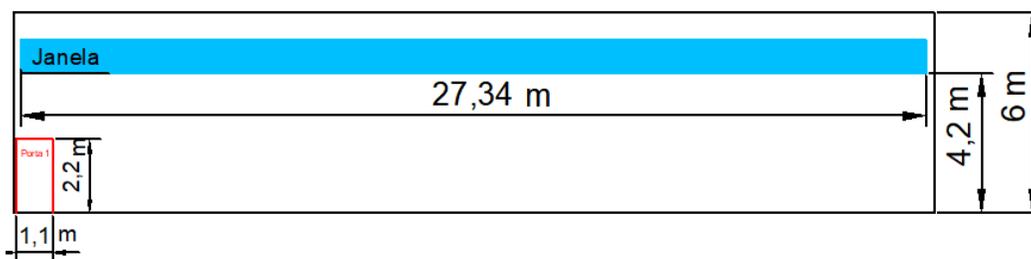
5.1 ABERTURAS

Na edificação foram previstas duas portas de acesso externo, onde ambas terão 2,20 metros de altura e 1,10 metros de vão, de acordo com a Resolução Técnica nº 11 – Parte

1: Saídas de emergência (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL, 2016). Estas permanecerão fechadas durante todas as simulações, não ocorrendo a entrada de gás oxigênio por estas.

Foram projetadas também janelas de 1 metro de altura e 27,34 metros de comprimento nas quatro faces da edificação. Estas estão a 4,2 metros do piso e a 0,8 metros da laje superior da edificação. Esta configuração de aberturas foi escolhida de modo a promover ventilação abundante, quando existente, e uniforme ao longo de toda edificação, além de ser semelhante ao tipo de abertura comumente encontrada em depósitos (localizadas na parte superior do depósito). Na figura 16 está apresentada o corte da fachada onde podemos visualizar as medidas das aberturas e da altura da edificação.

Figura 16 – Corte da fachada da edificação simulada com as aberturas



(fonte: elaborado pela autora)

5.2 CARGAS DE INCÊNDIO

No presente trabalho foram consideradas apenas as cargas de incêndio específicas do material estocado no depósito, que neste caso foram blocos de papel, não foram consideradas as cargas de incêndio dos materiais constituintes de pisos, paredes e lajes, ou seja, estes foram considerados inertes.

O Decreto nº 53.280 (RIO GRANDE DO SUL, 2016) classifica em 3 categorias o risco de incêndio em uma edificação, de acordo com sua carga de incêndio específica, como na tabela 1:

Tabela 1 - Classificação das edificações e áreas de risco quanto à carga de incêndio

Risco	Carga de incêndio
Baixo	até 300 MJ/m ²
Médio	até 600 MJ/m ²
Alto	Acima de 1200 MJ/m ²

(fonte: adaptada do Decreto nº 53.280
, 2016, p. 13)

As cargas de incêndio limítrofes das divisões de risco da tabela 1 mencionadas no Decreto nº 53.280 (RIO GRANDE DO SUL, 2016) foram as utilizadas na simulação. A partir destas foi possível definir a altura de cada bloco de papel com densidade de 750 kg/m³ e potencial calorífico do papel de 17 MJ/kg dado pela tabela A.1 da Resolução Técnica nº 03: Carga de Incêndio (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL, 2016).

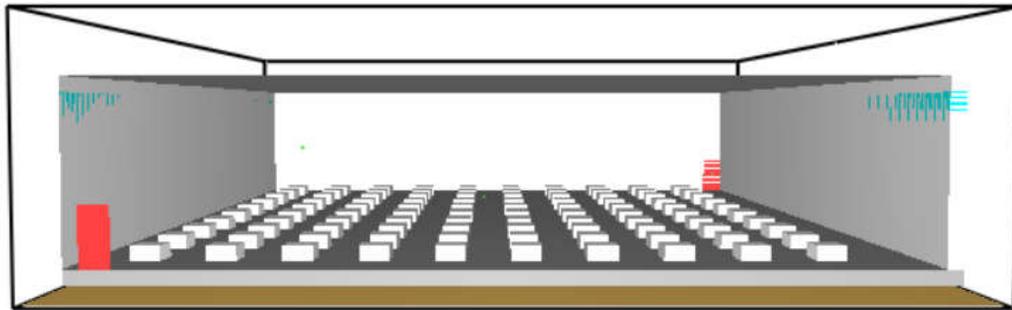
Nos blocos de material combustível utilizados como cargas de incêndios sua base foi fixada em 1 metro de largura por 1 metro de comprimento, utilizando 1 m² de área do pavimento. Estas dimensões foram adotadas de modo a cobrir boa área de piso da edificação, mantendo uniforme o incêndio sob todo o pavilhão.

5.3 DISTRIBUIÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

Foram consideradas duas disposições diferentes da carga de incêndio no interior da edificação, a espalhada uniformemente e a concentrada em metade da edificação.

Em uma das disposições a carga de incêndio estará espalhada sob a superfície da edificação de maneira uniforme, como na figura 17. Nesta foram utilizados 100 blocos idênticos com características detalhadas no item anterior, cobrindo uma área de 100 m² do piso da edificação.

Figura 17 - Blocos de papel uniformemente distribuídos



(fonte: elaborado pela autora)

Em outro momento as cargas de incêndio foram dispostas de maneira a se concentrar em apenas metade da edificação por 50 blocos uniformemente distribuídos, como na figura 18, cobrindo uma área de 50 m² do piso da edificação.

Figura 18 - Blocos concentrados dentro da edificação



(fonte: elaborado pela autora)

Para obtenção da altura dos blocos utilizados como carga de incêndio utilizou-se a Equação 1 e foram fixadas as áreas de blocos paralelas ao chão em 1 m² e variada a altura conforme a carga de incêndio específica desejada. Desta forma a carga de incêndio analisada dos 50 blocos concentrados apresentaram o dobro da altura dos 100 blocos distribuídos ao longo de toda edificação.

Utilizando a Equação 1, podemos obter a altura dos blocos de papel como podemos ver a seguir a memória de cálculo para uma carga de incêndio de 1200 MJ/m² e distribuição uniforme (100 blocos):

$$q_{fi} = \frac{\sum (M_i \cdot H_i)}{A}$$

$$1200 \frac{MJ}{m^2} = \frac{100 * (\gamma_p * V_b) * 17 \frac{MJ}{kg}}{A}$$

$$1200 \frac{MJ}{m^2} = \frac{100 * (\gamma_p * A_b * h_b) * 17 \frac{MJ}{kg}}{A}$$

$$1200 \frac{MJ}{m^2} = \frac{100 * \left(750 \frac{kg}{m^3} * 1 m^2 * h_b \right) * 17 \frac{MJ}{kg}}{750 m^2}$$

$$h_b = \frac{1200 \frac{MJ}{m^2} * 750 m^2}{100 * 750 \frac{kg}{m^3} * 1 m^2 * 17 \frac{MJ}{kg}} = 0,7059 m$$

Onde:

q_{fi} = Carga de incêndio específica, em mega Joule por metro quadrado de área do piso considerado.

H_i = potência calorífica específica de cada componente do material i , em mega Joule por quilograma.

M_i = massa de cada componente i do material, em quilograma.

A = área do piso do compartimento analisado, em metro quadrado.

V_b = volume ocupado por cada blocos, em metro cúbico

γ_p = densidade dos blocos de papel, em quilograma por metro cúbico

A_b = Área ocupada por cada bloco, em metro quadrado

h_b = altura de cada blocos, em metro

Na tabela 2 a seguir são dadas as alturas dos blocos junto a sua respectiva carga de incêndio específica.

Tabela 2 - Altura dos blocos de papel utilizados como carga de incêndio.

Carga de incêndio específica	Espalhada uniformemente	Concentrada
300 MJ/m ²	0,1765 m	0,3529 m
600 MJ/m ²	0,3529 m	0,7059 m
1200 MJ/m ²	0,7059 m	1,4118 m

(fonte: elaborado pela autora)

6 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

No presente capítulo são vistos os parâmetros utilizados no software *Pyrosim* de forma a obter-se um resultado comparável com a realidade. A seguir são apresentadas as propriedades do material utilizado como papel, a reação de combustão utilizada pelo software, a malha de cálculo, a fonte de ignição e as ferramentas utilizadas para coletas de dados.

Convém ser mencionadas as verificações realizadas por Brunetto (2016) para os blocos de papéis que também foram utilizados no presente estudo onde se chegou à conclusão de que estes representam de forma satisfatória o comportamento do papel sob ação do fogo. 6.1 REAÇÃO DE COMBUSTÃO

O *Fire Dynamics Simulator* leva em consideração como ocorre a reação de combustão, visto que esta depende de inúmeros fatores como materiais, mecanismos de transmissão de energia, gases presentes no ambiente e como estes interagem entre si.

Como não são conhecidas todas as reações químicas ocorridas durante o incêndio em um pavilhão, nesta simulação foi admitida uma única reação de combustão definida conforme o código de verificação de edificações a incêndio por simulação computacional da Nova Zelândia.

O NEW ZELAND BUILDING CODE (2014, p. 28) define os produtos da reação de combustão independentemente de qual material se utilize para representar a carga de incêndio da simulação. De acordo com este código foram escolhidas as características para os produtos da reação de combustão conforme o proposto para incêndios antecedentes ao *flashover*.

A configuração dos parâmetros da reação de combustão no *Pyrosim* pode ser observada na Figura 19 a seguir:

Figura 19 - Telas de configuração de parâmetros de reações do *Pyrosim*

The figure displays two screenshots of the Pyrosim software interface, showing configuration parameters for fire reactions.

Top Screenshot (Fuel Tab):

- Fuel Type:** Simple Chemistry Model
- Fuel assumed to contain only C, O, H, and N.**
- Composition:**
 - Carbon atoms: 1,0
 - Hydrogen atoms: 2,20209
 - Oxygen atoms: 0,622494
 - Nitrogen atoms: 0,0
- Fire Suppression:**
 - Enable Fire Suppression
 - Critical Flame Temperature: 1327,0 °C
 - Automatic Ignition Temperature: 0,0 °C

Bottom Screenshot (Heat Release Rate Tab):

- Mathematical Formulas:**

$$\dot{q}'' = \min \left(\dot{q}_{\max}'' , \frac{\rho \min(Y_{F_s}, Y_{O_2})}{\tau} \right) \Delta H$$

$$\dot{q}_{\max}'' = \frac{\dot{q}_{\max}''}{\delta X} + \dot{q}_{\max}''$$
- Input Fields:**
 - \dot{q}_{\max}'' Maximum heat release rate per unit area of flame sheet: 200,0 kW/m²
 - \dot{q}_{\max}'' Maximum heat release rate per unit volume: 2500,0 kW/m³
- Energy Released:**
 - Specify release per unit mass oxygen: 1,31E4 kJ/kg
 - Specify heat of combustion: 2,0E4 kJ/kg
 - Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)
- Yields and Fractions:**
 - CO Yield (Y_{CO}): 0,04
 - Soot Yield (Y_S): 0,07
 - Hydrogen Fraction: 0,0

(fonte: elaborado pela autora)

6.2 PROPRIEDADES DO PAPEL

Como já foi mencionado anteriormente, para que ocorra o fenômeno do fogo é preciso que haja um material combustível para que este alimente e sirva de corpo para sua propagação.

O papel será o único material combustível na edificação em questão. A escolha desse material se deu devido ao conhecimento de suas propriedades térmicas e seu uso comum em diversos estabelecimentos. As propriedades térmicas do papel estão apresentadas da tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades térmicas do papel

Propriedades térmicas do papel		
Densidade	750	Kg/m ³
Calor específico	1,336	KJ/(kg*K)
Condutividade	0,1	W/(m*K)
Emissividade	0,93	
Coefficiente de absorção	50000	1/m

(fonte: adaptado de The Engineering Tool Box, 2010, tradução nossa)

A seguir, na Figura 20, podemos ver uma tela de configurações do material utilizado no software *Pyrosim*.

Figura 20 - Tela de propriedades térmicas de material no Pyrosim

The screenshot shows the Pyrosim material configuration window for 'Papel'. The 'Thermal Properties' tab is active, displaying the following values: Density (750,0 kg/m³), Specific Heat (Constant, 1,336 kJ/(kg·K)), Conductivity (Constant, 0,1 W/(m·K)), Emissivity (0,9), and Absorption Coefficient (5,0E4 1/m). The 'Heat of Combustion' is checked and set to 2,0E4 kJ/kg. The 'Reactions' section is currently empty.

(fonte: elaborado pela autora)

Conforme o National Bureau Of Standards (2003) e Greenwood (2003) a temperatura de ignição do papel foi estabelecida como sendo de 200°C no *Pyrosim*.

Conforme gráficos expostos por TAN et al. (2011) e HURLEY (2016) a taxa de perda de massa máxima do papel durante a exposição ao fogo de um incêndio se aproxima de 0,04 Kg/(m².s), coerente pois estudos indicam que a madeira possui uma taxa de perda de massa de aproximadamente 0,01 Kg/(m².s) (SHI; CHEW, 2013, p. 1401). Nas presentes simulações a taxa de perda de massa do papel foi considerada constante durante o tempo em que ocorre o incêndio.

6.3 DEFINIÇÃO DE MALHA PARA A SIMULAÇÃO

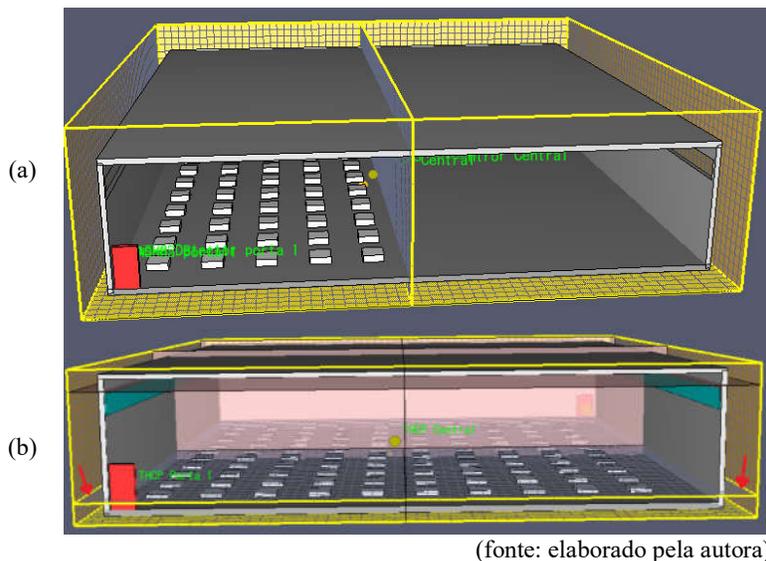
Em simulação computacional pelo método dos elementos finitos o ambiente é representado por pontos conectados entre si denominados nós e estes ligados entre si formam a malha. Através desta malha foram realizados cálculos matemáticos de forma aproximada. Ou seja, a precisão do método é dependente da geometria adotada pela malha utilizada no modelo computacional. Quanto menor for o tamanho da malha mais precisos serão seus resultados, porém maior será a demanda computacional exigida para resolução deste. Foram utilizados dois tipos de malhas para estas simulações.

Primeiramente foram testadas três malhas de simulação para o presente trabalho. Uma com células de 0,25 m e outra com células de 0,5 m. As estimativas de tempo de resolução dos modelos foram dadas pelo próprio programa *Pyrosim*, com base nas malhas do modelo já pronto para simulação com dimensões de 30 m x 30m x 7 m.

A malha de células de 0,25 m apresentava melhor adequação às dimensões introduzidas no modelo, porém a demanda computacional era muito maior, com aproximadamente 130.000 células, chegando a tempos de processamento de aproximadamente 300 h para cada simulação.

Já a malha de 0,50 m se adequou de forma satisfatória às dimensões do modelo. Seu tempo de processamento de aproximadamente 20 horas foi um fator preponderante na escolha desta malha, de 50.400 células, já que seriam realizadas 12 simulações em computadores domésticos. Para duas simulações específicas foi necessário diminuir o tamanho da altura da malha de 0,5 m para 0,25 m, formando pequenos blocos de 0,5x0,5x0,25m isto foi utilizado na região com blocos combustíveis pequenos de 0,17 m (simulações de carga de incêndio de 300 MJ/m² e distribuição uniforme), para que estes fossem entendidos de maneira correta pelo *software*, como mostrado na figura 21:

Figura 21 - Malha uniforme de 0,5m e malha mista de 0,25 m e 0,5 m



Na parte indicada pelas setas na figura 21 podemos ver a malha de 0,25 m envolvendo a carga de incêndio de 300 MJ/m². Todas as outras células são de 0,5 m.

6.4 FONTE DE IGNIÇÃO

Conforme já foi mencionado anteriormente para que se inicie a reação de combustão é necessário que haja uma fonte de calor. A fonte de calor adotada para o presente trabalho foi da energia elétrica, justificada pelo uso em praticamente todas as edificações e, dentre as causas conhecidas de ocorrência de incêndios, ser um dos maiores provocadores de sinistros.

Nestas simulações a fonte de calor escolhida foi o arco elétrico que se forma devido a passagem de corrente elétrica por material geralmente não condutivo como o ar, movimentando-se a altas velocidades e provocando altas temperaturas, cerca de 4000°C segundo (GREENWOOD, 2003).

Para representar o arco elétrico no *Pyrosim* foi usada a ferramenta de partícula localizada no centro da edificação (Figura 22) com uma temperatura superficial de 4000°C atuando por 1s.

Figura 22 – Localização da fonte de ignição do incêndio simulado



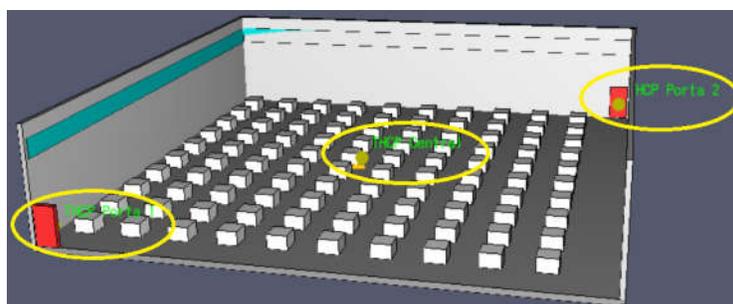
(fonte: elaborado pela autora)

6.5 FERRAMENTAS PARA COLETA DE DADOS

Para monitoramento da temperatura do incêndio como um todo foi utilizada a ferramenta de estatística para obtenção da temperatura média e temperatura máxima do ambiente. Como ferramenta de análise gráfica foram escolhidas as de fatias de temperatura. Como ferramentas pontuais foram utilizados os termopares.

Os termopares são sensores pontuais amplamente utilizados para medição de temperaturas ao longo de um dado tempo, geralmente ligados a um computador que armazena os dados gerados. Nas presentes simulações com *Pyrosim* foram utilizados termopares no centro e nas portas, a 1 m do piso do interior da edificação, como mostrado na figura 23.

Figura 23 - Localização dos termopares no pavilhão



(fonte: elaborado pela autora)

As ferramentas de estatísticas apresentadas pelo *Pyrosim* só podem ser utilizadas no ambiente simulado, uma vez que não há como mensurar a temperatura de cada partícula do ambiente real. Nas simulações realizadas esta ferramenta foi planejada de forma a apresentar as temperaturas médias e máximas com base em todo ambiente interno da edificação simulada.

As fatias de temperatura foram projetadas de forma a analisar o comportamento da temperatura do incêndio de forma visual, uma vez que estas representam por cores o grau de temperatura atingido. A ferramenta de fatia do *Pyrosim* deve ser posicionada em um eixo escolhido previamente, antes do processo de resolução numérica da simulação. Nas presentes simulações os eixos escolhidos foram os da tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Localização das fatias de visualização de temperaturas no modelo

Plano	Localização	Posição
X	Parede lateral direita	0,5 m
X	Parede lateral esquerda	27 m
Y	Parede do fundo	27 m
Z	Teto	5,5 m

(fonte: elaborado pela autora)

As fatias de temperatura não puderam ser colocadas mais próximo às paredes pois o *Smokeview* as interpretava como se estivessem dentro da parede. Acredita-se que isto tenha ocorrido devido ao tamanho elevado da malha da simulação.

7 RESULTADOS OBTIDOS

No presente capítulo são expostas as análises visuais, quantitativas e qualitativas referentes às temperaturas das simulações realizadas no *Pyrosim* e *FDS*.

7.1 ANÁLISE VISUAL DAS SIMULAÇÕES

A análise visual das simulações abrangeu alguns aspectos do comportamento do incêndio como as temperaturas, a forma como as chamas se espalharam, o tempo até a ocorrência do *flashover* e a queima dos materiais combustíveis. Esta análise foi realizada no programa de visualização de simulação de incêndios *Smokeview*.

No *Smokeview* a análise visual foi realizada sem a presença da fumaça, apenas visualizando as chamas e os planos de monitoramento de temperatura. A não presença da fumaça justifica-se pela dificuldade de visualizar o comportamento do fogo e a não visualização das fatias de temperatura, bem como da carga de incêndio.

O critério de parada das simulações realizadas foi a convergência da temperatura média do ambiente. Ao se verificar que esta temperatura se estabilizou no gráfico de temperatura x tempo se pode interromper, uma vez que se estava investigando as maiores temperaturas do ambiente e seu comportamento ao longo do tempo.

7.1.1 Simulação 1: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e sem aberturas

A simulação 1 realizada no *notebook* Samsung¹, teve um tempo de processamento de aproximadamente 15 horas para 33 minutos de simulação.

¹ processador Intel® Core™ i3 de 2 núcleos (com velocidade de processamento de 2 GHz cada) e memória RAM de 4 GB.

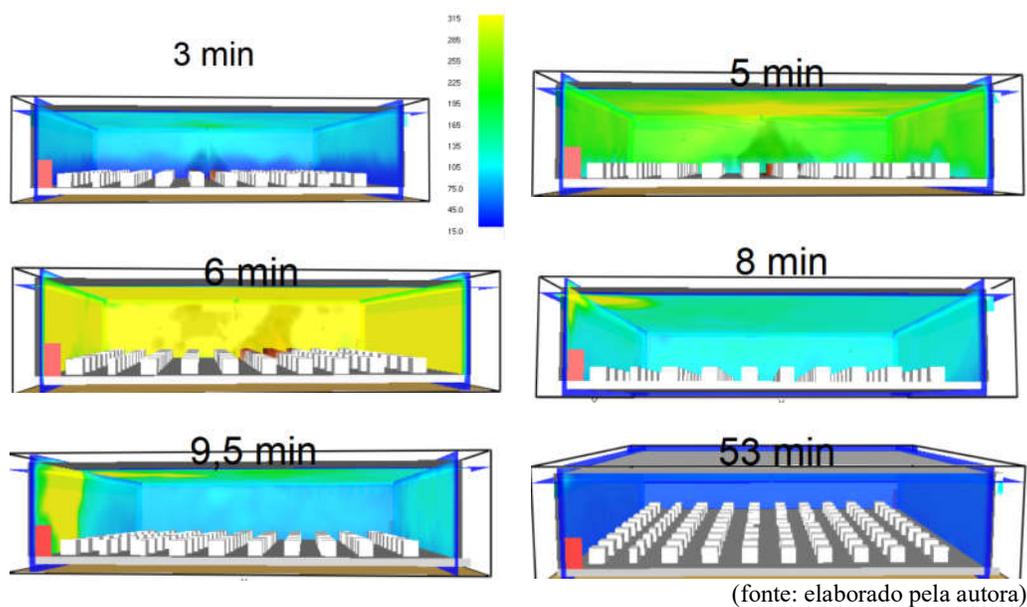
Logo após a ignição 4 blocos da parte central entraram em combustão, se propagando rapidamente para seus adjacentes.

O *flashover* foi percebido a partir de metade do 5º minuto até o início do 6º minuto, atingindo temperaturas de cerca de 320 °C. Acredita-se que esta curta duração ocorra devido à falta de oxigenação do ambiente, uma vez que a alta carga de incêndio demande grande quantidade de oxigênio para a ocorrência da combustão. Também é interessante que se note que a temperatura no *flashover* é uniformemente alta em todo ambiente, como representado na figura 25 do 6º minuto.

Logo após o incêndio generalizado o ambiente se resfria para temperaturas de 200° C e volta a subir no início do 8º minuto, mesmo sem a entrada de ar no ambiente.

Após o novo foco de incêndio a temperatura do ambiente começou a cair rapidamente, como podemos visualizar nas imagens da figura 24, já sendo de menos de 100° C com menos de 1 hora de incêndio.

Figura 24 - Imagens da simulação 1

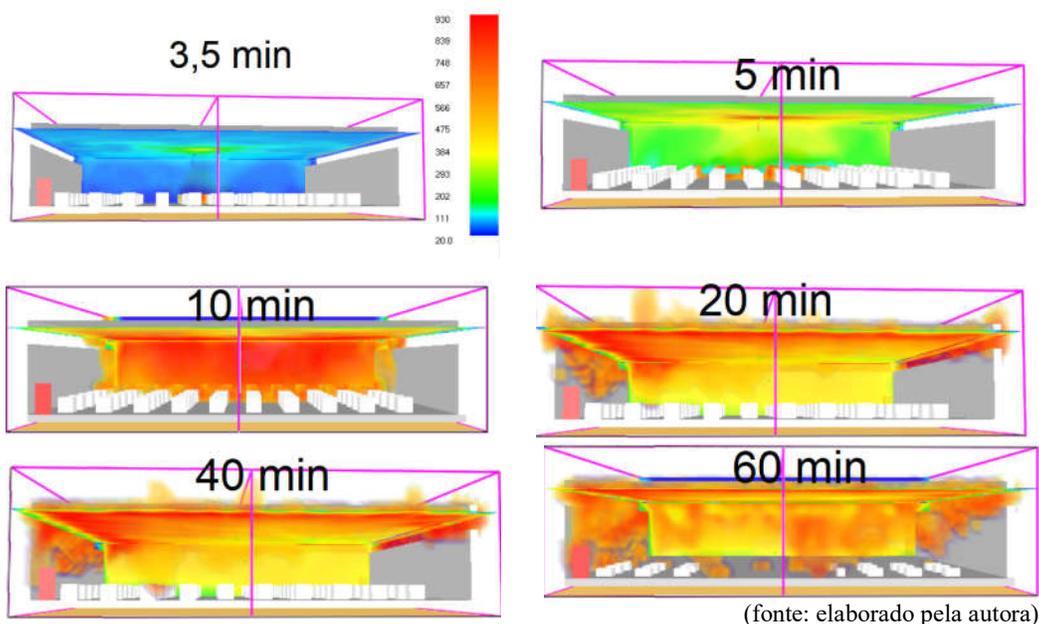


7.1.2 Simulação 2: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² uniformemente distribuída e com aberturas

A simulação 2 foi realizada no computador Digimix², demandando um tempo e processamento de aproximadamente 45 horas para 60 minutos de simulação.

Na simulação 2 foi possível observar que o incêndio se espalhou de forma rápida por todo ambiente, tornando-se generalizado por volta dos 11,5 minutos, mantendo o ambiente sob altas temperaturas até o final das simulações aos 60 minutos. Podemos ver o desenvolvimento da simulação na figura 25 a seguir:

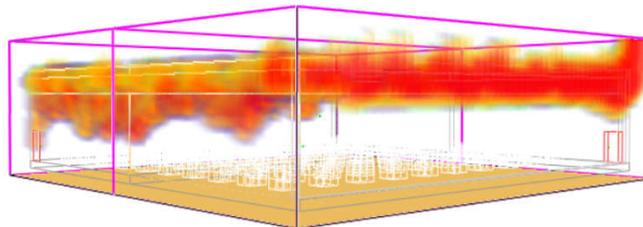
Figura 25 – Imagens da simulação 2



² processador Intel® Pentium® Dual CPU E2180 de dois núcleos (cada um com velocidade de processamento de 2 GHz) e memória RAM de 2 GB.

Logo em seguida ao *flashover* nota-se que a representação da chama do *Smokeview* sobe para a parte superior da edificação, permanecendo desta forma até o final da simulação, como podemos ver na figura 26, sem as fatias de temperatura.

Figura 26 - fogo junto ao teto



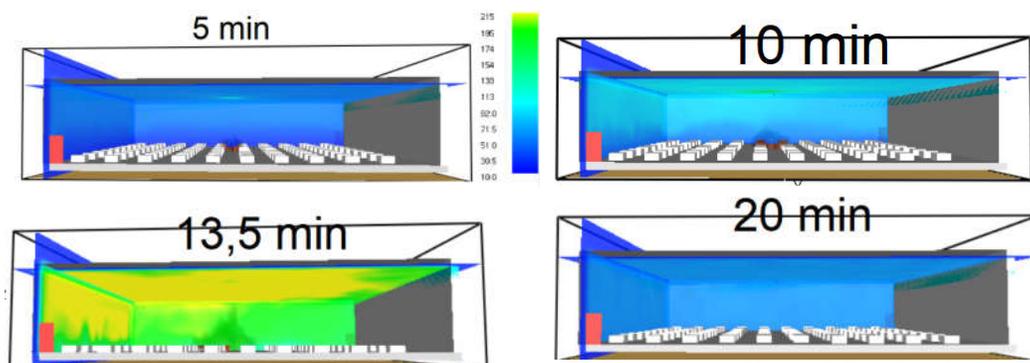
(fonte: elaborado pela autora)

7.1.3 Simulação 3: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e sem aberturas

A simulação 3 foi realizada no computador Samsung com tempo de processamento de aproximadamente 8 horas para 60 minutos.

Na simulação 3 pode-se perceber que houve um retardo na propagação do fogo com relação a simulação 1 (de 1200 MJ/m²). Somente após quase 7 minutos de simulação se percebeu a propagação do fogo para os blocos de papéis adjacentes, e a partir daí foi vista uma propagação moderadamente rápida do fogo pela edificação, como se pode verificar na figura 27.

Figura 27 -Imagens da simulação 3



(fonte: elaborado pela autora)

O *flashover* ocorreu aproximadamente no minuto 13 e não durou mais que 2 minutos, atingindo temperaturas da ordem de 220 °C nas paredes do ambiente. Logo após a temperatura começa a cair, com 20 minutos a temperatura já é inferior a 100 °C em praticamente todo ambiente.

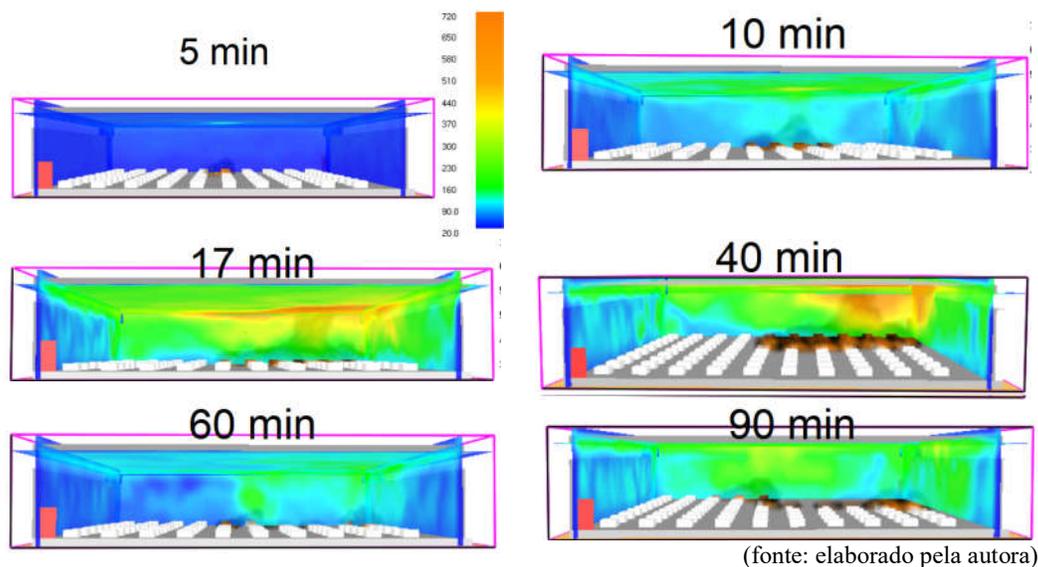
7.1.4 Simulação 4: Carga de incêndio de 600 MJ/m² uniformemente distribuída e com aberturas

A simulação 4 foi realizada no computador Digimix por cerca de 38h para 60 minutos de simulação.

Assim como nas simulações anteriores o incêndio começou na parte central da edificação, mas ao contrário delas, onde as chamas foram espalhando-se de maneira quase uniforme, na simulação 4 o incêndio concentrou-se na parte do fundo da edificação.

Até o final da simulação, aos 90 minutos, não se percebeu visualmente o incêndio generalizado dos materiais combustíveis na edificação, como podemos ver na figura 28.

Figura 28 – Imagens da simulação 4



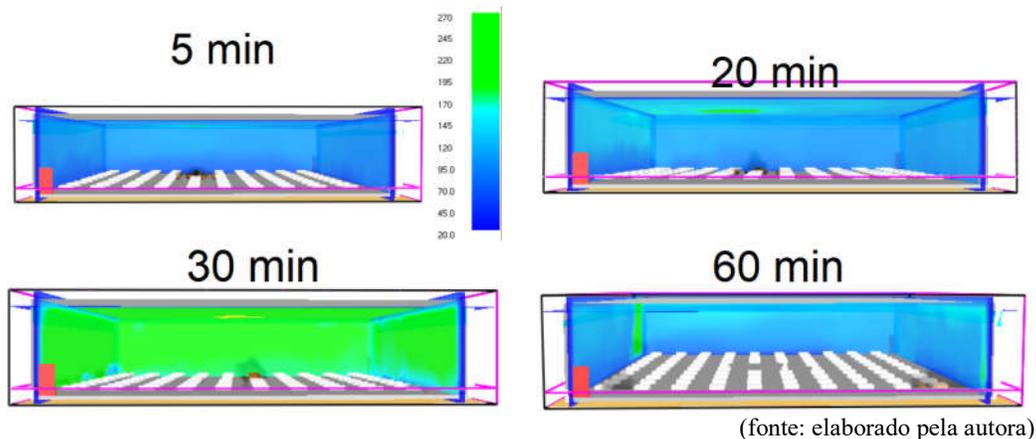
7.1.5 Simulação 5: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e sem aberturas

Para a simulação 5 foi necessária a criação de uma malha diferente da usada na maioria das outras simulações. Na parte do piso da edificação da simulação 5 foi necessária a redução do tamanho da malha de 0,5x0,5x0,5 m para 0,5x0,5x0,25 m pois os blocos da carga de incêndio de 300 MJ/m² nesta simulação possuíam 0,1765 m e eram interpretados de maneira errônea pelo programa pois eram muito pequenos para a malha de 0,5x0,5x0,5m. Desta forma a simulação demorou cerca de 87 h para ser processada pois era composta por 57.600 células, para 4800 segundos de simulação.

Nesta simulação podemos notar que só após 20 minutos se alcançou temperaturas no ambiente maiores que 200 °C.

Aos 30 minutos notou-se a ocorrência de um incêndio generalizado na edificação, chegando a temperaturas acima de 300° C, como podemos ver na figura 29.

Figura 29 - Imagens da simulação 5



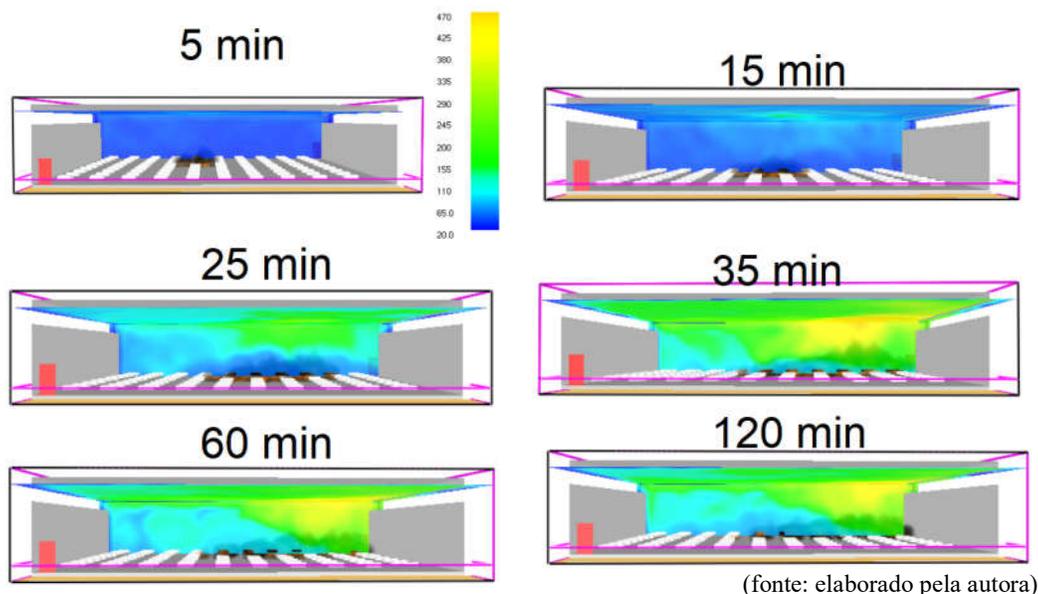
7.1.6 Simulação 6: Carga de incêndio de 300 MJ/m² uniformemente distribuída e com aberturas

Assim como a simulação 5, na simulação 6 também foi necessária malha especial para atender à pequena altura dos blocos de papel. Para a parte da carga de incêndio da edificação se usou uma malha de 0,5x0,5x0,25 visto que não era necessária a adaptação

à largura dos blocos, apenas quanto à altura. Dessa maneira a malha de $0,5 \times 0,5 \times 0,25$ possuiu 57.600 células, demandando um tempo de aproximadamente 25 h de processamento da simulação. Para esta simulação também foi usado outro computador, mais potente que os anteriores.

Na simulação nota-se que o fogo se concentra no centro da edificação até aproximadamente os 20 minutos de incêndio, para só depois se espalhar para a parte do fundo da edificação, onde permanece até o final da simulação. Não se percebeu a ocorrência de incêndio generalizado em toda carga combustível da edificação até final da simulação (cerca de 120 minutos), como podemos ver nas imagens da figura 30. A partir do minuto 35 a simulação permaneceu semelhante até o final, aos 120 minutos.

Figura 30 - Imagens da simulação 6



7.1.7 Simulação 7: Carga de incêndio de 1200 MJ/m^2 concentrada em um lado da edificação e sem aberturas

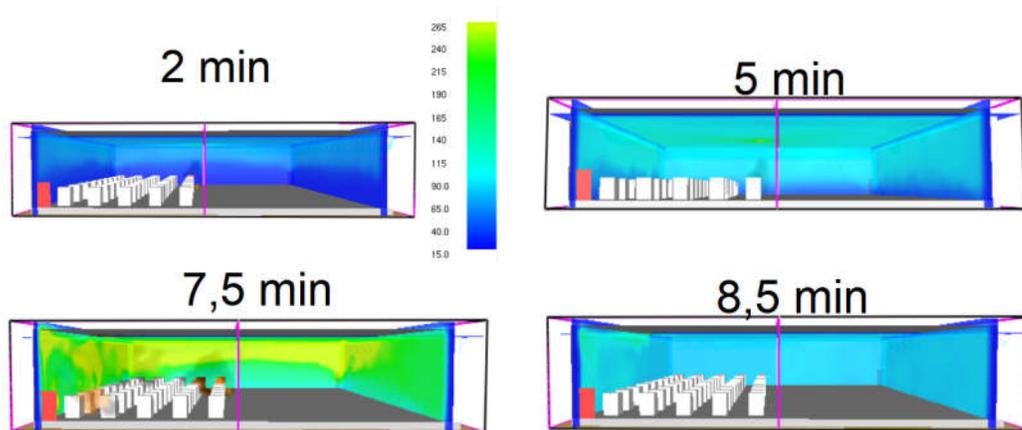
A simulação 7 foi processada no computador Samsung por cerca de 40 h para 8 minutos de simulação. Não foram simulados maiores tempos devido a constantes instabilidades numéricas para esta simulação.

Somente após 2 minutos do início da ignição do bloco de papel central ocorreu a propagação para os blocos adjacentes e a partir daí a temperatura subiu rapidamente no ambiente, chegando a temperaturas em torno de 200° C aos 5 minutos.

O incêndio generalizado ocorreu por volta do 7º minuto, com temperaturas acima de 250° C. Assim como na simulação 1, notou-se que após o incêndio generalizado a temperatura diminuiu e voltou a subir no minuto 8.

Uma observação interessante a se fazer é que o ambiente se aquece muito pouco antes do incêndio generalizado, indicando que o aquecimento do ambiente é quem de fato provoca a inflamação de todos os blocos e não a passagem da chama de bloco em bloco, ou seja, a transmissão do calor se deu majoritariamente por convecção do que radiação, como podemos ver na figura 31.

Figura 31 - Imagens da simulação 7

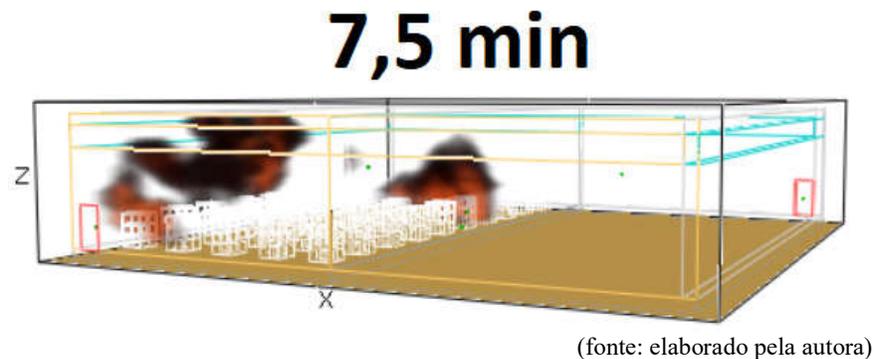


(fonte: elaborado pela autora)

É interessante que se note que na metade do 7º minuto pouco antes da ocorrência o *flashover* percebeu-se que após os blocos de papel do meio inflamarem foram seguidos pelos blocos mais externos e por último os blocos intermediários como podemos ver na primeira imagem da figura 32. Uma hipótese para este evento seja de que ao fazer o movimento ascensional os gases quentes e a fumaça aquecida colidem com o teto da edificação e parte destes gases aquecidos são direcionados para as paredes que aquecem o ar próximo a elas e acabam por inflamar os blocos de papel mais externos ao centro da edificação, este fenômeno foi descrito no item 3.4.4.1 deste trabalho e chama-se *Ceiling*

Jet (ou jato de teto) que se dá por meio da convecção. Este indício de movimento dos gases quentes pode ser visto na figura 32.

Figura 32 - Fatias de temperatura com indícios da movimentação dos gases quentes



7.1.8 Simulação 8: Carga de incêndio de 1200 MJ/m² concentrada em um lado da edificação e com aberturas

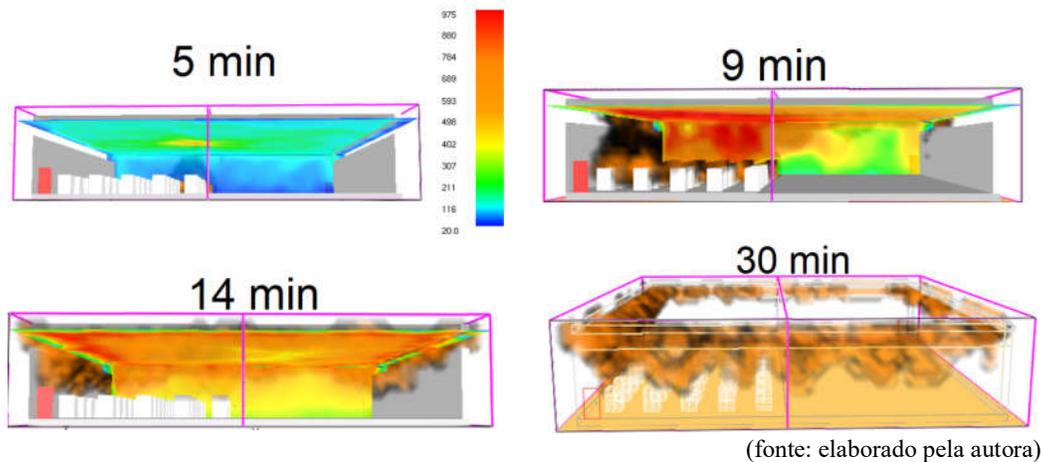
Para a simulação 8 foi utilizado o computador Samsung por cerca de 13 horas para simulação de aproximadamente 90 minutos, onde houve o desaparecimento de todas as cargas de incêndio da edificação e o incêndio terminou.

Após 3 minutos da ignição o bloco inicial começa a propagar fogo para seu adjacentes.

A partir do 9º minuto podemos observar a ocorrência do *flashover* com temperaturas acerca de 1000° C na superfície do teto e na superfície da parede do fundo da edificação. Este se percebe no material combustível até por volta do minuto 11. A partir daí ocorre a elevação das chamas para parte superior do ambiente, como mostra a figura 33, e permanecendo ali até praticamente o fim da simulação.

Um fato que chama atenção nesta simulação é o tempo que a edificação fica submetida a altas temperaturas, desde o minuto 6 até o final da simulação, aos 80 minutos, se percebem temperaturas de 500° C a 1000° C no ambiente.

Figura 33 - Imagens da simulação 8



7.1.9 Simulação 9: Carga de incêndio de 600 MJ/m² concentrada em um lado da edificação e sem aberturas

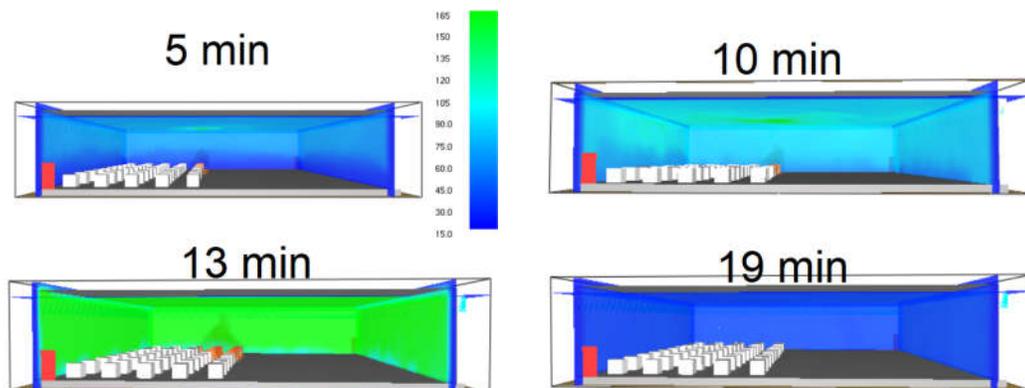
A simulação 9 foi realizada no computador Samsung por cerca de 23h para 80 minutos de simulação de incêndio na edificação.

Após a ignição as chamas permaneceram no bloco de papel central até o final do minuto 11, quando começou a se propagar para seus adjacentes.

Não se pode notar a ocorrência do incêndio generalizado em todas as cargas de incêndio através do programa *smokeview*. As maiores temperaturas ocorreram por volta do minuto 13.

A partir do 19º minuto já se tem temperaturas abaixo de 100º C e esta decresce até o final da simulação aos minutos, como podemos ver na figura 34.

Figura 34 - Imagens da simulação 9



(fonte: elaborado pela autora)

7.1.10 Simulação 10: Carga de incêndio de 600 MJ/m² concentrada em um lado da edificação e com aberturas

Para a realização da simulação 10 foi utilizado o computador da marca Positivo³ por cerca de 40 horas e foram simulados 75 minutos de incêndio.

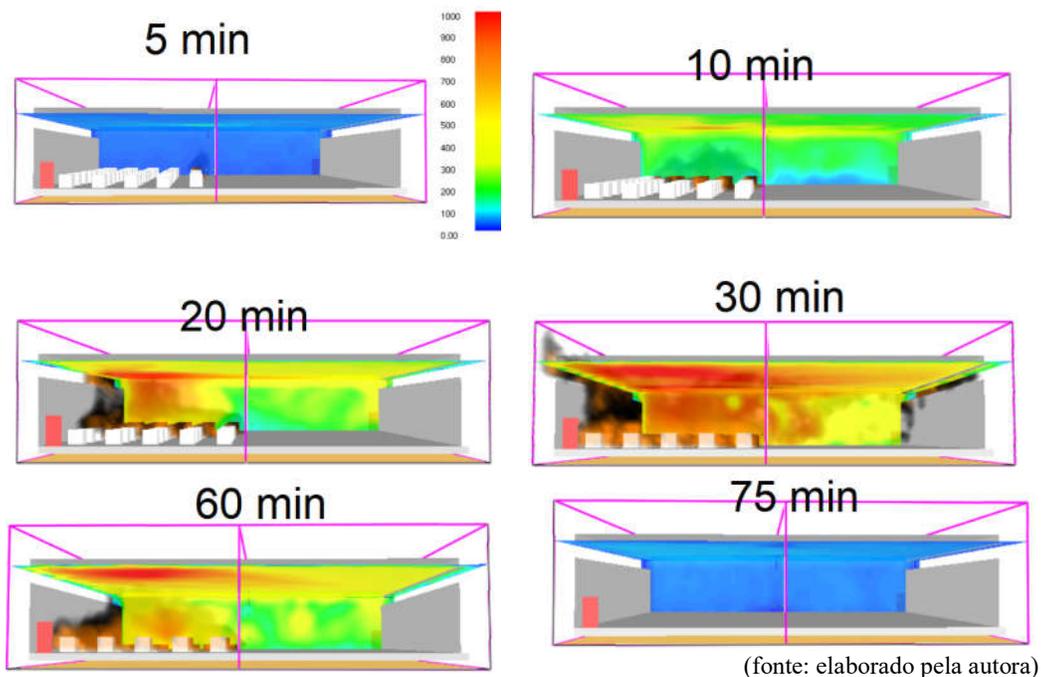
Por volta do 7º minuto após a ignição o incêndio começou a se espalhar de forma gradual, de bloco em bloco de papel da edificação.

O incêndio generalizado dos materiais combustíveis ocorreu por volta do minuto 25 chegando a temperaturas acima dos 1000° C em grande parte da edificação. É interessante notar que a temperatura se manteve alta por grande período de tempo na edificação, acima dos 350° C, como podemos notar na figura 35.

A carga de incêndio terminou de ser consumida próximo ao minuto 75. A partir daí a temperatura começou a cair rapidamente na edificação.

³ processador Intel® Celeron® CPU N3010 de dois núcleos (cada um com velocidade de processamento de 1,04 GHz) e memória RAM de 4 GB.

Figura 35 - Imagens da simulação 10



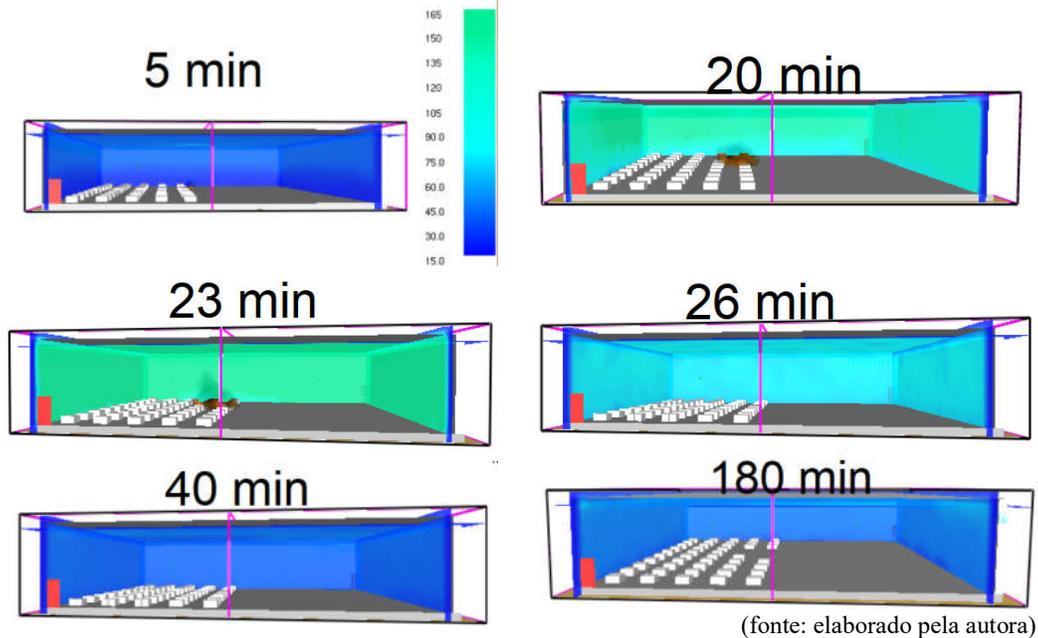
7.1.11 Simulação 11: Carga de incêndio de 300 MJ/m² concentrada em um lado da edificação e sem aberturas

A simulação 11 foi realizada no computador da marca Samsung por cerca de 5 horas para 70 minutos de simulação de incêndio.

Somente após 18 minutos da ignição do bloco central ocorreu a propagação para seus blocos adjacentes e o fogo se manteve na parte central até o fim da simulação.

Logo em seguida, aos 22 minutos ocorreu a temperatura acima de 200° mas em praticamente toda edificação mas não se pode notar chama visível, assim como na simulação 9. A partir daí ocorreu a queda gradual da temperatura, como podemos perceber na figura 36. Isto provavelmente tenha ocorrido devido à falta de oxigenação do ambiente interno da edificação. Aos 48 minutos os blocos de papéis centrais começaram a sumir gradualmente até o fim da simulação, aos 180 minutos.

Figura 36 - Imagens da simulação 11



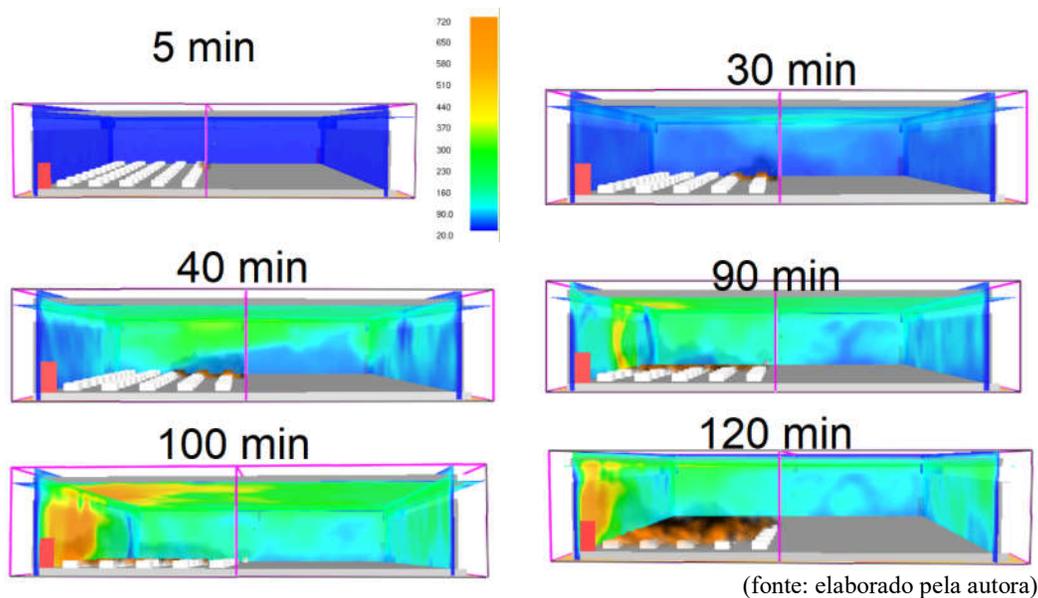
7.1.12 Simulação 12: Carga de incêndio de 300 MJ/m² concentrada em um lado da edificação e com aberturas

A simulação de número 12 foi realizada por cerca de 30 horas no computador da marca Samsung. Foram simulados 100 minutos de incêndio na edificação.

Após a ignição da carga de incêndio no início da simulação demorou cerca de 40 minutos até que as chamas começassem a se propagar do bloco de papel central (primeiro a entrar em ignição) para os seus adjacentes. Neste momento a temperatura mais alta que se percebia no ambiente era de aproximadamente 130° C.

Até o final da simulação, aos 100 minutos, não se percebeu o incêndio generalizados dos materiais combustíveis. Até o presente momento o incêndio se manteve na metade de trás dos blocos de papel, como podemos ver na figura 37.

Figura 37 - Imagens da simulação 12



7.1.13 Conclusões obtidas através da análise visual

Através da análise visual das simulações se pode observar que a carga de incêndio influi muito no comportamento do incêndio, sendo de fato as mais altas muito mais perigosas pois se propagam muito rápido. Nota-se também que quanto maior a carga de incêndio maiores são as temperaturas ocorridas no interior da edificação.

Quanto as aberturas na edificação se observou que quando elas existem mantêm as temperaturas altas por mais tempo. Desta forma a existência de ventilação na edificação do ponto de vista das temperaturas é bem mais perigoso.

Quanto à disposição da carga de incêndio na edificação, não se observaram diferenças relevantes.

7.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção serão apresentados dados quantitativos e estatísticos referentes as simulações computacionais realizadas.

Em um primeiro momento foi feito um levantamento quantitativo das temperaturas máximas obtidas através dos dispositivos de coleta de dados propostos pelo *Pyrosim*. Desta forma foi possível construir a tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Dados quantitativos das simulações realizadas

Computador	Janelas	Distribuição da carga	Carga de incêndio (MJ/m ²)	Processamento (horas)	Versão do Pyrosim	Duração (s)	Temperatura média máxima		Temperatura máxima (°C)		Termopares - temperatura máxima						
							°C	(s)	(°C)	(s)	Centro		Porta 1		Porta 2		
										(°C)	(s)	(°C)	(s)	(°C)	(s)	(°C)	(s)
1	Samsung	Não existentes	Uniforme	1200 MJ/m ²	18	2017	3200	339	352	1670	424	812	344	339	352	305	352
2	Positivo	Existentes	Uniforme	1200 MJ/m ²	45	2017	3600	739	670	1384	587	1116	659	690	745	612	515
3	Samsung	Não existentes	Uniforme	600 MJ/m ²	8	2017	7000	151	875	971	868	693	840	230	882	189	868
4	Digimix	Existentes	Uniforme	600 MJ/m ²	38	2014	4800	227	2295	1373	1328	239	5303	90	3002	478	3100
5	Digimix	Não existentes	Uniforme	300MJ/m ²	87	2014	3200	116	1771	866	1653	328	1636	167	2057	108	1749
6	Samsung	Existentes	Uniforme	300MJ/m ²	25	2014	7200	180	2750	1245	1937	141	1030	62	2686	310	3233
7	Samsung	Não existentes	Concentrada	1200 MJ/m ²	40	2017	513	232	454	1773	508	248	454	241	508	218	454
8	Positivo	Existentes	Concentrada	1200 MJ/m ²	13	2014	5000	651	620	1095	595	679	635	759	605	469	635
9	Samsung	Não existentes	Concentrada	600 MJ/m ²	11	2017	4800	204	822	1610	801	242	822	184	801	215	822
10	Positivo	Existentes	Concentrada	600 MJ/m ²	40	2014	4878	545	1734	1050	1848	469	1860	812	3852	452	2496
11	Samsung	Não existentes	Concentrada	300MJ/m ²	5	2017	10400	181	1393	973	4115	163	1404	180	1404	166	1339
12	Samsung	Existentes	Concentrada	300MJ/m ²	30	2014	6000	184	6822	739	2236	133	1695	785	7155	156	2818

(fonte: elaborado pela autora)

Ao analisarmos a tabela 5 podemos notar que em todas as simulações, para uma mesma configuração de disposição da concentração da carga de incêndio e uma mesma configuração de aberturas, e para quase todos os dispositivos de coletas de dados (exceto no termopar da porta 1), ao aumentarmos a carga de incêndio aumentou também a temperatura, porém esta relação não se manteve proporcional.

Ao mantermos a carga de incêndio e uma mesma distribuição na edificação, variando as aberturas de não existentes para existentes podemos notar um aumento da maior temperatura média todas as simulações, mas isto não se manteve para todos os dispositivos de coletas de dados como podemos ver na tabela 6.

Quando mantidas as mesmas cargas de incêndios e aberturas e passarmos da distribuição uniformemente distribuída no ambiente para a concentrada podemos notar o aumento da temperatura média máxima do ambiente em 4 de 6 simulações. (exceções são simulações 1 para 7 e 2 para 8).

Pode-se notar também que as temperaturas dos termopares próximos às portas não apresentaram a mesma temperatura, mesmo com carga de incêndio uniformemente distribuída ao longo da edificação, apesar da geometria da edificação ser simétrica. Isto

provavelmente tenha ocorrido devido ao fato da fonte de ignição estar ligeiramente à esquerda do ponto central da edificação.

Tabela 6 – Resumo da análise de temperaturas máximas de cada dispositivo de coleta de dados

	Media Máxima	Máxima	Termopares		
			Central	TP1	TP2
Casos em que aumentou a temperatura ao aumentar a carga de incêndio:	12/12	12/12	12/12	11/12	12/12
Casos em que aumentou a temperatura ao colocar aberturas na edificação:	6/6	2/6	3/6	4/6	5/6
Casos em que aumentou a temperatura ao concentrar a carga de incêndio:	4/6	3/3	1/6	3/6	1/6

(fonte: elaborado pela autora)

7.3 ANÁLISE QUALITATIVA DAS SIMULAÇÕES

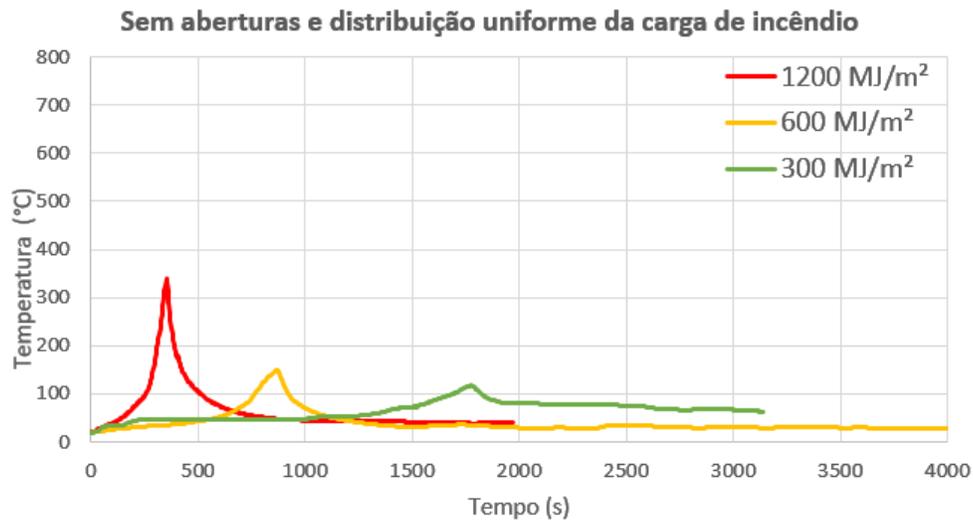
Nesta seção serão realizadas análises qualitativas através de comparações quanto ao comportamento das simulações ao variarmos as cargas de incêndios, existência ou não de aberturas e distribuição da carga de incêndio ao longo do ambiente.

7.3.1 Comparações entre cargas de incêndios

A seguir serão discutidos os dados gerados pela simulação de incêndio realizada no FDS e comparadas suas semelhanças e diferenças ao variarmos a carga de incêndio específica da edificação.

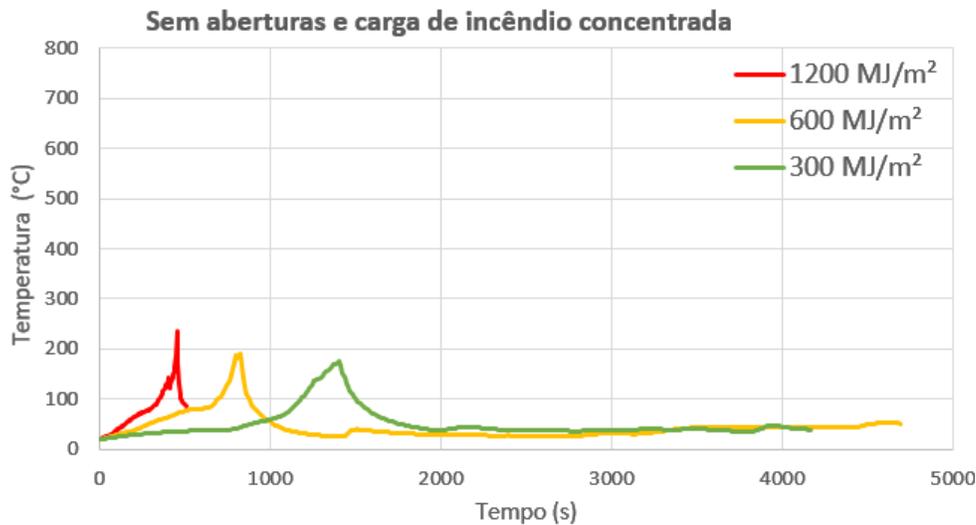
Como o descrito anteriormente, com a ferramenta de estatística do *Pyrosim* foi possível saber a média de temperatura do ambiente ao longo do tempo e desta forma construir gráficos das figuras 38 a 41.

Figura 38 – Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação sem aberturas e distribuição uniforme da carga de incêndio



(fonte: elaborado pela autora)

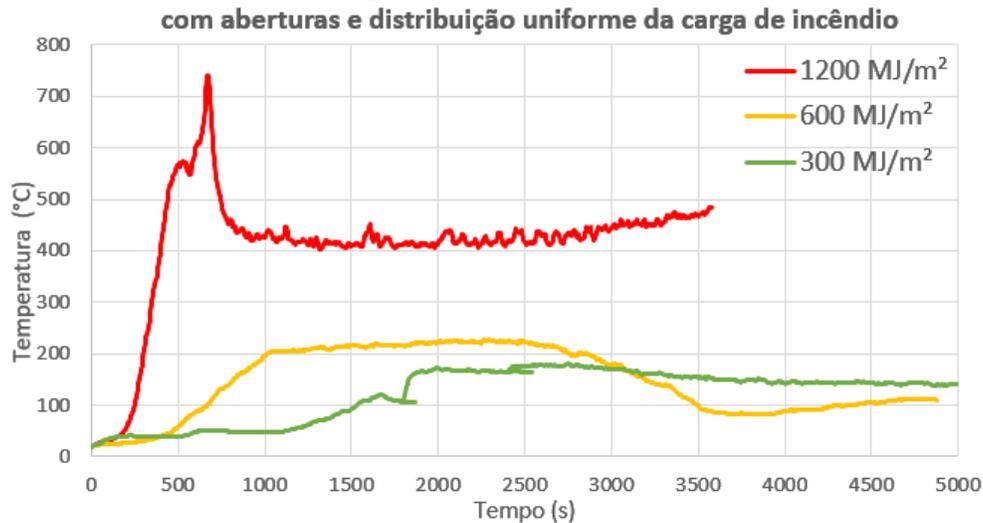
Figura 39 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação sem aberturas e carga de incêndio concentrada



(fonte: elaborado pela autora)

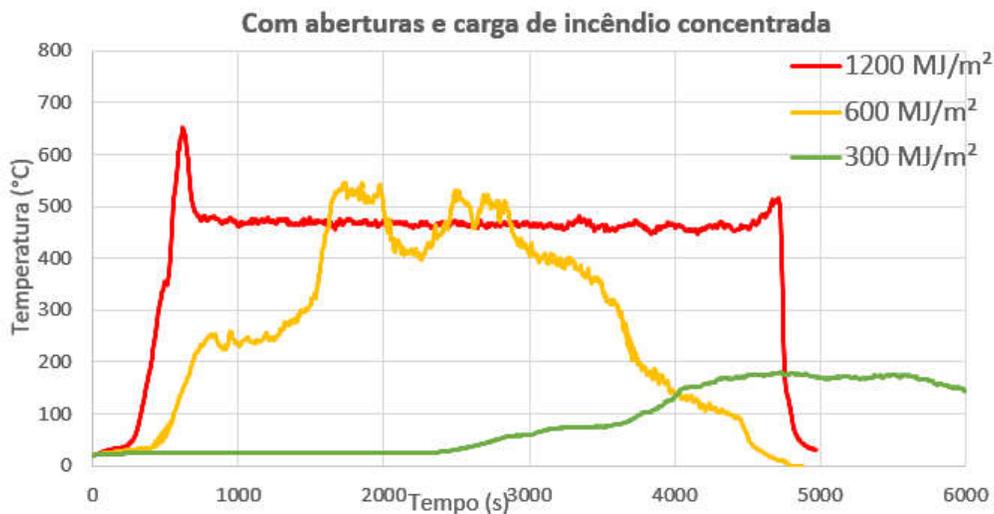
Nas figuras 38 e 39, das simulações realizadas com aberturas fechadas, podemos observar que após atingir o pico de temperatura média do ambiente, esta cai abruptamente, isto é um indicativo de que ao atingir o incêndio generalizado houve gasto de grande parte do oxigênio disponível dentro da edificação e como não há reposição de oxigênio no interior da edificação o incêndio acaba por se extinguir, o que faz despencar a temperatura. Já nas figuras 40 e 41, das simulações realizadas com janelas abertas, a temperatura diminui abruptamente até certo ponto, onde mantém-se sob patamar alto, provavelmente mantendo o incêndio controlado pela ventilação, até que se termine a carga de incêndio.

Figura 40 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação com aberturas e carga de incêndio uniformemente distribuída



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 41 - Gráfico de temperatura média do ambiente ao longo do tempo para a edificação com aberturas e carga de incêndio concentrada



(fonte: elaborado pela autora)

As simulações realizadas no presente trabalho indicam que quanto maior a carga de incêndio específica menor será o tempo decorrido da ignição do material combustível até atingir o incêndio generalizado, ou seja, altas temperaturas serão atingidas mais rapidamente, o que representa de fato um maior perigo a vida humana e à estrutura da edificação. Isto provavelmente ocorre pois quanto maior a carga de incêndio maior é a quantidade de material combustível a ser consumido pelo fogo liberando mais energia para o ambiente.

Nas figuras 38 a 41 pode-se constatar um comportamento semelhante em todas as configurações de aberturas e distribuição: a carga de incêndio específica de 1200 MJ/m² atinge o *flashover*, incêndio generalizado, antes da carga de incêndio específica de 600 MJ/m² e esta por sua vez antes da carga de incêndio específica de 300 MJ/m². Ou seja, quanto maior foi a carga de incêndio antes ocorreu o incêndio generalizado na edificação.

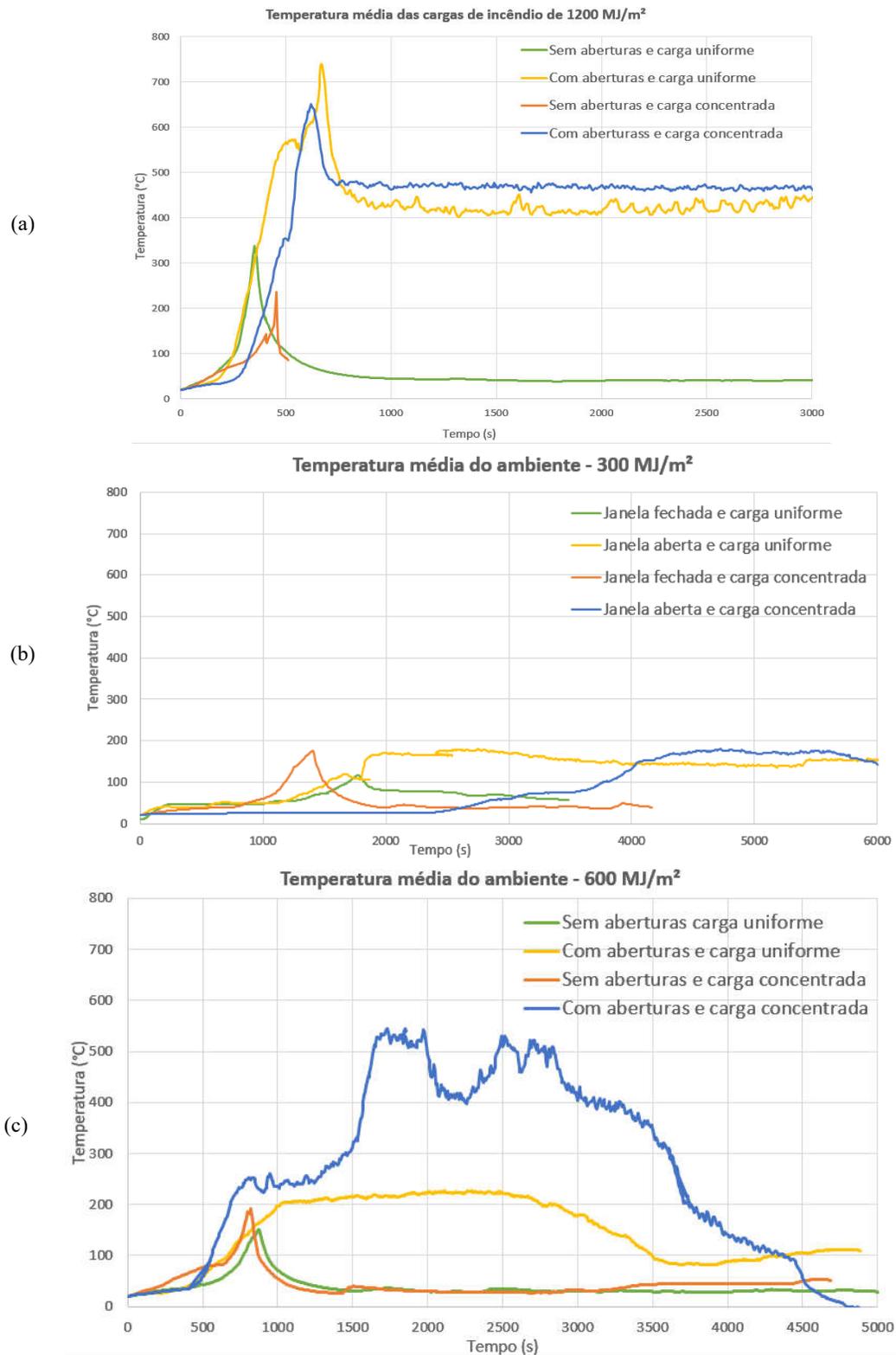
Outro aspecto que se pode notar é que quanto maior a carga de incêndio maiores são as temperaturas médias do ambiente e antes elas ocorrem no decorrer do tempo, como podemos ver no pico de cada curva de temperatura das figuras 38 a 41.

7.3.2 Comparação entre simulações sem aberturas, com aberturas, cargas distribuídas uniformemente e cargas concentradas.

Nesta seção serão comparadas as temperaturas das simulações sem aberturas às com aberturas juntamente com concentração das cargas distribuídas ao longo do piso da edificação, que foram dispostas de maneira a se distribuir uniformemente e de maneira concentrada.

A seguir na figura 42 são vistas as temperaturas médias do ambiente ao longo do tempo de cada umas das cargas de incêndio.

Figura 42 – Curvas de temperaturas médias do ambiente ao longo do tempo



(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 42, relativa à temperatura média do ambiente ao longo do tempo, podemos notar que quanto maior a carga de incêndio mais concentradas são as curvas de temperatura, e mais parecidas são as curvas de temperatura para uma mesma carga de incêndio. Como podemos notar este fenômeno ocorre após o *flashover* e justamente por este demandar grande quantidade do oxigênio disponível no ambiente crê-se que a diminuição da concentração de oxigênio no ambiente acabe extinguindo o incêndio. Este fenômeno pode estar sendo mais acentuado em cargas de incêndio maiores pois seu incêndio generalizado demande maiores quantidades de oxigênio que cargas de incêndio menores.

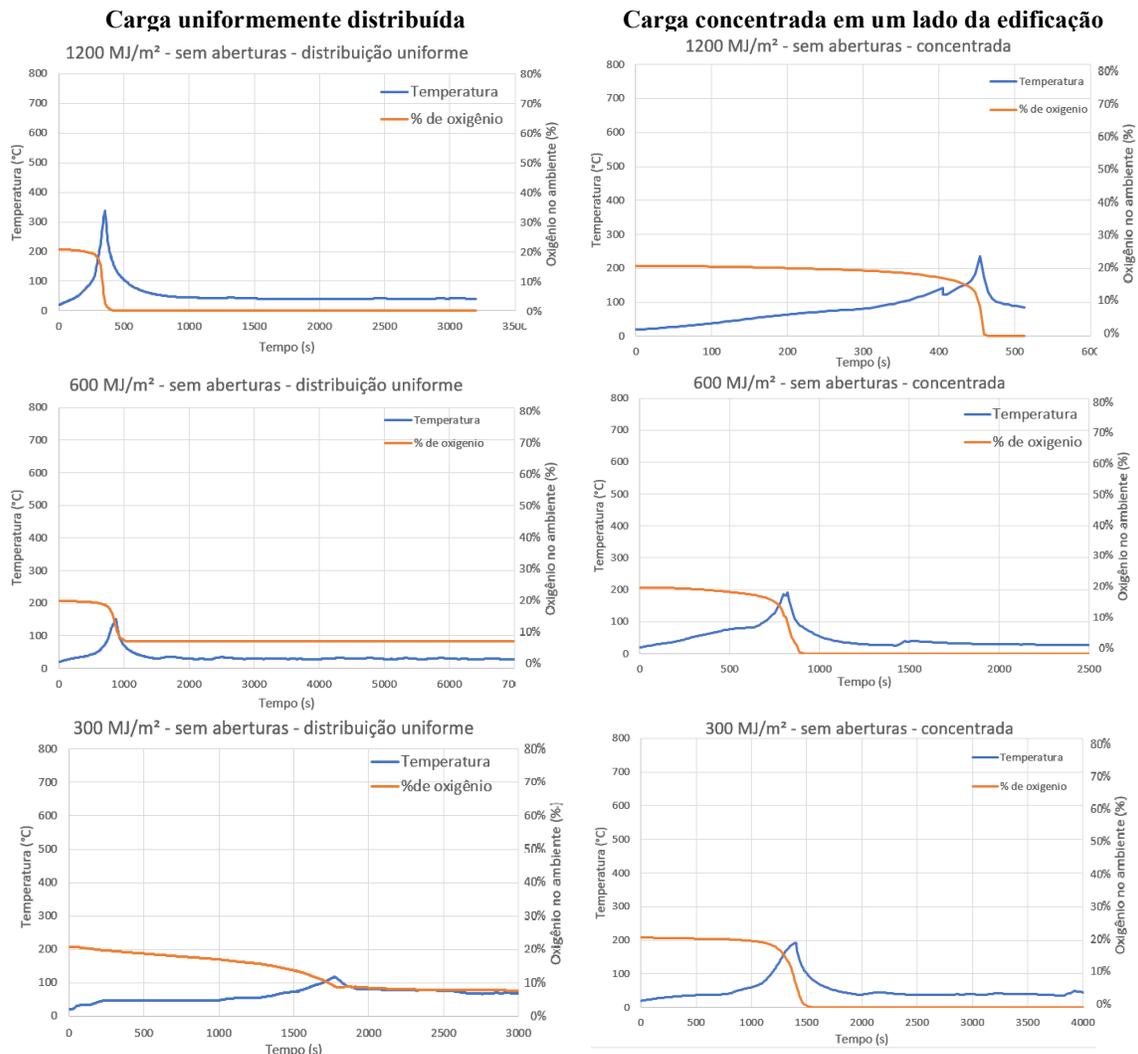
Sobre relação da carga uniformemente distribuída ao longo da edificação para com a concentrada não se pode notar um padrão comportamental para as cargas de incêndio analisadas para esta edificação específica.

Podemos notar, ainda com base na figura 42, que quanto menor a carga de incêndio maior é a sensibilidade da curva de temperatura média x tempo, ou seja, ao alterarmos uma variável no ambiente simulados as cargas menores têm um comportamento mais instável.

7.3.3 Oxigênio no ambiente

Nas Figuras 43 e 44 foram sobrepostas as curvas de temperatura e da concentração de oxigênio do ambiente de todas as simulações para que se entendesse melhor esta relação.

Figura 43 - Relação da temperatura e do oxigênio ao longo do tempo das simulações sem aberturas

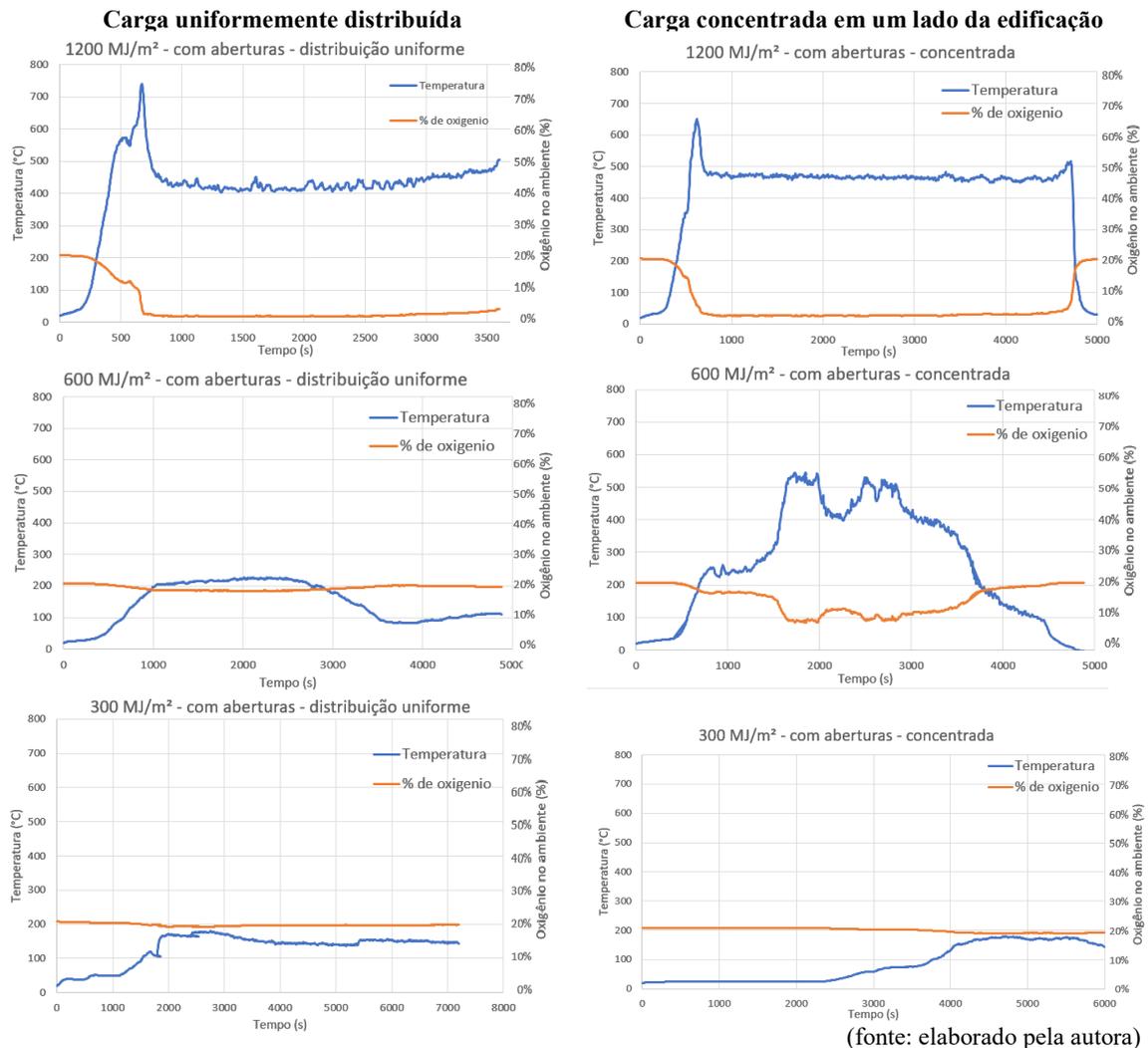


(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 43, das simulações realizadas sem aberturas na edificação, podemos claramente perceber que quando há a ocorrência do incêndio generalizado a porcentagem de oxigênio no ambiente cai drasticamente. Provavelmente isto ocorra de todo, ou quase todo, material combustível do ambiente está sob chamas e isto demande grande quantidade do oxigênio presente no ar.

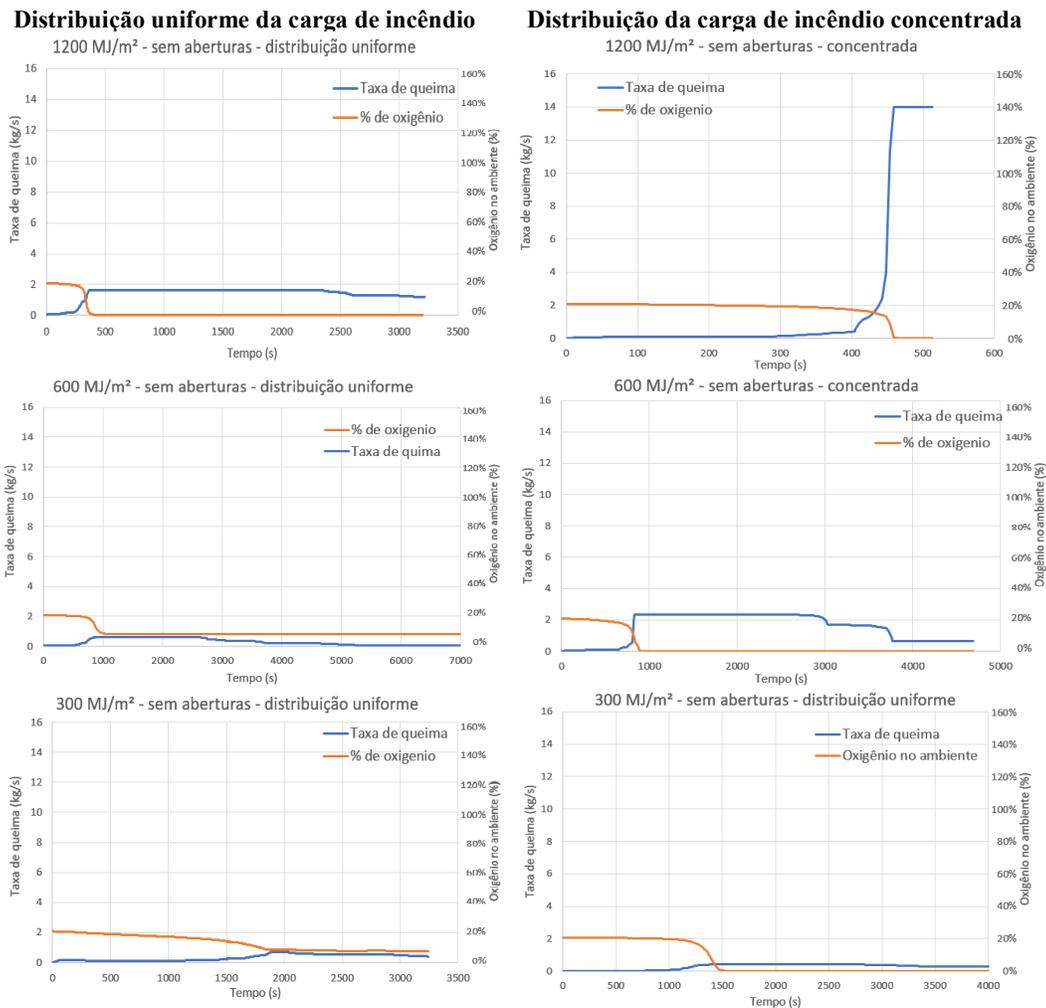
Já na figura 44, das simulações realizadas com aberturas na edificação, é possível notar que a após a ocorrência do *flashover* a concentração de oxigênio do ambiente diminui, mas é suficiente para manter as chamas no ambiente, o que faz com que a temperatura do ambiente fique alta mais tempo do que quando não há aberturas na edificação.

Figura 44 - Relação da temperatura e do oxigênio ao longo do tempo das simulações com aberturas



Nas simulações do depósito sem aberturas pode-se perceber uma anomalia nos momentos em que a concentração de oxigênio no ambiente era quase nula. Mesmo com níveis baixíssimos de oxigênio no ambiente os materiais combustíveis continuavam seu processo de combustão, sendo que de acordo com Brentano (2015) para concentrações abaixo de 14% de oxigênio no ambiente praticamente nenhum material consegue manter o processo de combustão. Esta anomalia pode ser confirmada ao compararmos os gráficos de oxigênio com o gráfico da taxa de perda de massa (ou taxa de queima) dos materiais combustíveis, como podemos ver na figura 45:

Figura 45 – Relação da taxa de queima com o oxigênio do ambiente para simulações sem aberturas



(fonte: elaborado pela autora)

Uma provável causa desta anomalia seja o algoritmo de supressão do fogo do FDS que tenta avaliar se a combustão é ou não viável com base na liberação de energia no local. Segundo McGrattan (2013), a energia deve ser suficiente para elevar a temperatura acima da adotada como crítica para que a combustão ocorra. O valor temperatura crítica, mínima, da chama adotado como padrão pelo FDS e utilizado nestas simulações é 1327 °C.

A energia no local pode ter sido suficiente para que o FDS continuasse o processo de combustão mesmo sem o oxigênio no ambiente.

8 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizadas 12 simulações sendo variadas entre elas as cargas de incêndio, a existência ou não de aberturas e a distribuição do material combustível na edificação.

Com relação ao processamento das simulações se chegou às seguintes conclusões:

- a) O conjunto de programas se mostrou adequado à realização destes testes uma vez que se obtiveram, em geral, dados coerentes com o que se esperava das simulações.
- b) Para a simulação do pavilhão sem aberturas e o conjunto de malhas sendo considerado como de superfície aberta (*vents* com superfície no modo “*open*”) o *software* interrompia a simulação devido à instabilidade numérica. Uma hipótese para ocorrência de tamanha instabilidade é de que o programa espera que com superfícies abertas ocorra oxigenação do ambiente e isto não ocorre devido a inexistência de aberturas na edificação.
- c) O tempo de processamento de cada simulação depende muito de cada tipo de computador e de quanto este está sendo usado para outras tarefas.

Após o processamento das simulações foram realizadas análises visuais (com bases na observação do incêndio no *Smokeview*), análises quantitativas (com base em tabelas com dados gerados pelo FDS) e análises qualitativas (com base nos gráficos de temperatura x tempo dos dados gerados pelo FDS) e todas estas análises convergiram para os mesmos resultados.

8.1 CONCLUSÕES SOBRE A VARIAÇÃO DA CARGA DE INCÊNDIO

Quanto a quantidade da carga de incêndio podemos fazer as seguintes considerações baseada nas análises realizadas anteriormente, para uma mesma configuração das

aberturas da edificação e uma mesma distribuição dos materiais combustíveis na edificação:

- a) A quantidade de carga de incêndio presente na edificação altera muito o comportamento do incêndio fazendo com que o *flashover* (que é a pior situação do incêndio, pois é onde ocorre as maiores temperaturas e todo ambiente é tomado pelo fogo) ocorra antes para cargas de incêndio maiores. Desta forma podemos dizer que há indícios claros de que quanto maior a carga de incêndio mais cedo irá ocorrer o *flashover*.
- b) Da mesma forma que o item anterior se verificou para as temperaturas ocorridas no ambiente que quanto maior for a carga de incêndio maior serão as temperaturas registradas para um mesmo tempo.

Uma hipótese para que isto ocorra é que na existência de uma maior quantidade de material combustível na edificação maior é a quantidade de energia que se pode liberar no processo de combustão, fazendo que a temperatura do ambiente aumente mais rapidamente, chegando desta forma mais rapidamente ao incêndio generalizado.

Sendo assim com relação a carga de incêndio é prudente dizer que as classificações das normas brasileira, dos decretos e leis complementares estaduais são coerentes em classificar o risco de incêndio de uma edificação em baixo, médio e alto com relação às cargas de incêndio atuais.

8.2 CONCLUSÕES SOBRE A EXISTÊNCIA OU NÃO DE ABERTURAS

Nos casos em que se fixou a carga de incêndio e a distribuição dos materiais combustíveis na edificação e se variou a existência ou não de aberturas se obtiveram os seguintes padrões de comportamento nas análises:

Quando existem aberturas, após a ocorrência do incêndio generalizado a temperatura do ambiente se mantém elevada e o fogo dos materiais combustíveis permanece aceso. Já quando não há aberturas na edificação o fogo desaparece e os materiais combustíveis continuam sua combustão sem chamas aparentes, e a temperatura ambiente cai

drasticamente. Acredita-se que a falta de oxigênio em abundância no ambiente faz com que a luz das chamas se apague.

As aberturas na edificação fazem com que no início do incêndio a fumaça saia por elas, junto com parte do calor interno do ambiente. Por outro lado, existência de aberturas faz com que as temperaturas se mantenham altas e venham a expor por mais tempo a edificação a severas condições.

8.3 CONCLUSÕES SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DOS MATERIAIS COMBUSTÍVEIS

Para uma mesma edificação, com mesmas aberturas e cargas de incêndio e ao variarmos apenas a distribuição da carga de incêndio na edificação não se notou nenhum padrão comportamental da temperatura do ambiente.

Mesmo não sendo encontrado um padrão cabe ressaltar que isto foi variando em apenas duas distribuições bem específicas e que talvez para outras configurações de ambiente, de materiais, de aberturas, se exista algum padrão comportamental.

8.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos para este trabalho não podem ser extrapolados para outras edificações em uma primeira análise. Seria necessário estudar os mais variados tipos de edificações (tamanhos, formas, usos), materiais combustíveis, aberturas e analisar outros parâmetros como por exemplo a quantidade de fumaça, a toxicidade da fumaça, a evacuação de pessoas, para se chegar a uma conclusão definitiva sobre o tema. Além disso, é importante também a realização de estudos em escala real ou reduzida para comparações com os resultados obtidos nas simulações.

REFERÊNCIAS

- BONITESE, Karina Venâncio. **Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço**. 2007. Dissertação de mestrado em engenharia civil da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-7EUP5B/disserta__okarina2007.pdf>. Acesso em: 02 de jun. 2017
- BORCH, M. et al. **Handbook of physical testing of paper**. 2 ed. New York: CRC Press, 2001. 560 p.
- BRENTANO, T. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações**. 3 ed. Porto Alegre: Edição própria do editor, 2015.
- BRENTANO, T. **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. Porto Alegre: EdiPUC, 2007.
- BRUNETTO, L. O. . **Simulação computacional de incêndios: uma aplicação no prédio da escola de engenharia nova da UFRGS**. 2016. Trabalho de diplomação para obtenção do título de engenheiro civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/148710/001002314.pdf>>. Acesso em: 15 de jun. 2017.
- BUCHANAN, A. H. **Fire Engineering Design Guide**. New Zealand: University of Canterbury. A. H. Buchanan Editor, 1994.
- CAMILLO JUNIOR; BATISTA, Abel. **Manual de prevenção e combate a incêndios**. 15 ed. São Paulo: Senac São Paulo, 2013.
- CORREIO DO POVO. **Tragédia completa 10 anos**. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/impresso/?ano=115&numero=264&caderno=9-icia=156776>>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução técnica nº 02: Conceitos básicos de segurança contra incêndio**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.corpodebombeiros.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT_02_2011.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2016.
- _____. **Coletânea de Manuais Técnicos de Bombeiros: Ventilação Tática**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.bombeiros.com.br/new/mtb/14-ventila%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2016.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL. **Manual básico de combate a incêndio: módulo 1, comportamento do fogo**. Disponível em: <http://www.bombeiros.rr.gov.br/down/DEIOP/INCENDIO/MCI_Mod1_Comportamento_do_fogo.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2017

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL. **Resolução técnica nº 03: Carga de incêndio**. Porto alegre, 2017. Disponível em:

<<http://www.cbm.rs.gov.br/wp-content/uploads/2016/11/RTCBMRS-n.%C2%BA-03-2016-Carga-Inc%C3%AAndio.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2017

_____. **Resolução técnica nº 11 – Parte 1: Saídas de emergência**. Porto alegre, 2017.

Disponível em: <<http://www.cbm.rs.gov.br/wp-content/uploads/2016/09/RTCBMRS-n.%C2%BA-11-Parte-01-2016-Sa%C3%ADdas-de-Emerg%C3%AAncia-Vers%C3%A3o-corrigida.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2017

CUOGHI, Ricardo de Scarabello. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2006. Dissertação de mestrado em engenharia civil e urbanística – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-02042008-180545/en.php>>. Acesso em: 24 mai. 2016

FORNEY, G. **Smokeview (version 6) - technical reference guide**. Gaithersburg:

NIST special publication, 2017. Disponível em:

<https://github.com/firemodels/fds/releases/download/FDS6.5.3/SMV_Technical_Reference_Guide.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2017

GLOBO NEWS. **Arquivo N relembra os 40 anos do incêndio no edifício Joelma**.

Disponível em: <<http://g1.globo.com/globo-news/noticia/2014/01/arquivo-n-relembra-os-40-anos-do-incendio-no-edificio-joelma.html>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

GREENWOOD, Paul; DESMET, Koen. **Tactical firefighting**. Brussels: Cemac, 2003.

HURLEY, M. J. et al. **SFPE handbook of fire protection engineering**. 15 ed.

Greenbelt: Springer, 2015. 3493 p.

NEW ZELAND BUILDING CODE. **C/VM2 Verification method: framework for fire safety design**. Wellington, 2014.

MCGRATTAN, K. **Fire dynamics simulator (version 6) - technical reference guide**.

Washington: NIST special publication, 2013. Disponível em:

<https://github.com/firemodels/fds/releases/download/FDS6.5.3/FDS_User_Guide.pdf>. Acesso: 14 abr. 2017

METRO PORTO ALEGRE. **Maior tragédia de porto alegre, incêndio completa 40 anos**.

Disponível em: <<https://www.metrojornal.com.br/foco/2016/04/25/maior-tragedia-porto-alegre-completa-40-anos.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS **Self-ignition temperature of cellulose and magnesium**. Journal of the Franklin Institute, v. 234, n. 5, p. 492–493, 2003

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Fire dynamics**.

Disponível em: <<https://www.nist.gov/%3cfront%3e/fire-dynamics>>. Acesso em: 25 mai. 2017.

O GLOBO. **Acervo O Globo**. Disponível em: <http://acervo.oglobo.globo.com/incoming/9253702-ea2-21c/imagemhorizontalfotogaleria/12008-015337-_20011129.jpg>. Acesso em: 12 abr. 2016.

PEACOCK, D; JONES, W; FORNEY, G. P. **CFAST - consolidated model of fire growth and smoke transport**. NIST, 2005. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire05/PDF/f05114.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2016

QUINTIERE, J. G. **Enclosure Fire Dynamics**. Delmar Publisher, 1998.

RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa. **Lei Complementar n. 14.376**, de 26 de dezembro de 2013. Estabelece normas sobre Segurança, Prevenção e Proteção contra Incêndios nas edificações e áreas de risco de incêndio no Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/FileRepository/repLegisComp/Lec%20n%C2%BA%2014.376.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2016

_____. Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa. **Decreto n° 53.280**, de 26 de novembro de 2016. Altera o Decreto n° 51.803, de 10 de setembro de 2014, que regulamenta a Lei Complementar n° 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e alterações, que estabelece normas sobre segurança, prevenção e proteção contra incêndio nas edificações e áreas de risco de incêndio no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/DEC%2053.280retificado.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017

SANTUCCI, Jô. Incêndio na Boate Kiss: uma tragédia evitável?. **Revista CREA-RS**, Porto Alegre, n. 95, p. 23-27, mar. 2013.

SEITO, A. et al. **A segurança contra incêndio no brasil**. São Paulo: Projeto, 2008. 496 p.

SILVA, Valdir Pignatta E; VARGAS, M. R; ONO, R. **Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura**. Rio de Janeiro: IABr/CBCA, 2010. 72 p.

SILVA, Valdir Pignatta. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigate, 2001. 170 p.

SHI, L.; CHEW, M. Y. L. **Experimental study of woods under external heat flux by autoignition: Ignition time and mass loss rate**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 111, n. 2, p. 1399–1407, 2013

TAN, J; XIE, Y; ZHANG, X; WANG, T. **Analysis of combustion characterization of computer monitor and paper in conic calorimeter test**. Beijing Municipal Institute of Labor Protection. Vols. 282-283, pp. 169-172. Beijing, 2011.

ULTIMO SEGUNDO IG. **‘eu esperava o prédio desabar e morrer no concreto’, diz sobrevivente do Andraus.** Disponível em:

<<http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/sp/eu-esperava-o-predio-desabar-e-morrer-no-concreto-dizsobreviven/n1597650453407.html>> . Acesso em: 12 abr. 2016.

UOL NOTÍCIAS. **Incêndio em Santa Maria (RS).** Disponível em:

<<https://noticias.uol.com.br/album/2014/01/25/incendio-na-boate-kiss-em-santa-maria-rs-completa-um-ano.htm>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

ZONA DE RISCO. **Memória: mega incêndio na volkswagen.** Disponível em:

<<https://zonaderisco.blogspot.com.br/2008/08/memria-mega-incndio-na-volkswagen.html>>. Acesso em: 05 jun. 2017.